ТОМ 23, №4, 2023
eISSN 2687-1653
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Механика / Mechanics

Машиностроение и машиноведение / Machine Building and Machine Science

Информатика, вычислительная техника и управление / Information Technology, Computer Science and Management



www.vestnik-donstu.ru
DOI 10.23947/2687-1653



Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2000 года)

eISSN 2687–1653
DOI: 10.23947/2687–1653

Том 23, № 4, 2023

Создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях и перспективах в области механики, машиностроения, информатики и вычислительной техники. Издание является форумом для сотрудничества российских и иностранных ученых, способствует сближению российского и мирового научно-информационного пространства.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)
1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (технические, физико-математические науки)
1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы (технические науки)
1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)
2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
2.3.7 – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические, физико-математические науки)
2.3.8 – Информатика и информационные процессы (технические науки)
2.5.2 – Машиноведение (технические науки)
2.5.3 – Трение и износ в машинах (технические науки)
2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки)
2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
2.5.9 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы (технические науки)

Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Dimensions, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Выписка из реестра зарегистрированных средств массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	http://vestnik-donstu.ru/
Дата выхода в свет	30.12.2023





Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2000)

eISSN 2687–1653
DOI: 10.23947/2687–1653

Vol. 23, no. 4, 2023

The journal is aimed at informing the readership about the latest achievements and prospects in the field of mechanics, mechanical engineering, computer science and computer technology. The publication is a forum for cooperation between Russian and foreign scientists, it contributes to the convergence of the Russian and world scientific and information space.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The journal publishes articles in the following fields of science:
– Theoretical Mechanics, Dynamics of Machines (Engineering Sciences)
– Deformable Solid Mechanics (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
– Mechanics of Liquid, Gas and Plasma (Engineering Sciences)
– Mathematical Simulation, Numerical Methods and Program Systems (Engineering Sciences)
– System Analysis, Information Management and Processing, Statistics (Engineering Sciences)
– Automation and Control of Technological Processes and Productions (Engineering Sciences)
– Software and Mathematical Support of Machines, Complexes and Computer Networks (Engineering Sciences)
– Computer Modeling and Design Automation (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
– Computer Science and Information Processes (Engineering Sciences)
– Machine Science (Engineering Sciences)
– Machine Friction and Wear (Engineering Sciences)
– Technology and Equipment of Mechanical and Physicotechnical Processing (Engineering Sciences)
– Engineering Technology (Engineering Sciences)
– Welding, Allied Processes and Technologies (Engineering Sciences)
– Methods and Devices for Monitoring and Diagnostics of Materials, Products, Substances and the Natural Environment (Engineering Sciences)
– Hydraulic Machines, Vacuum, Compressor Equipment, Hydraulic and Pneumatic Systems (Engineering Sciences)

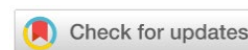
Indexing and archiving	RSCI, CyberLeninka, EBSCO, Dimensions, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
Name of the body that registered the publication	Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 78854 dated August 07, 2020, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Founder and publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
Periodicity	4 issues per year
Address of the founder and publisher	1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	vestnik@donstu.ru
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	http://vestnik-donstu.ru/
Date of publication	30.12.2023



Содержание

Contents

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 531.36
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-346-355

Научная статья

Программное управление движением робота с дифференциальным приводом при разных моделях трения


EDN: INDAIS

М.С. Салимов ✉, И.В. Меркурьев
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Российская Федерация
✉ SalimovMS@mpei.ru

Аннотация
Введение. Проектирование систем управления движением мобильных роботов требует построения математических моделей. Исследователи неоднократно обращались к этой теме. В частности, опубликованы работы, посвященные расчетам мультифизических процессов, моделированию движения различных видов колес в тех или иных условиях. Кроме того, рассматривались динамика деформируемых контактирующих тел при скольжении, качении и вращении, вопросы автономности и управляемости мобильных роботов. Отметим, что динамика и точность позиционирования колесных роботов во многом определяется трением. В литературе не представлены исследования динамики робота с дифференциальным приводом с учетом взаимосвязей эффектов трения скольжения, верчения и качения на основе теории поликомпонентного трения. Изыскания в этой области способны выявить новые динамические эффекты. Основываясь на полученных таким образом данных, можно заняться повышением точности позиционирования при построении математических моделей управления. Цель представленной работы — исследовать движение автоматического устройства с дифференциальным приводом с учетом трех моделей контакта: неголономного, кулоновского трения и поликомпонентного.
Материалы и методы. В качестве базовой приняли схему двухколесного робота с дифференциальным приводом и безотрывным движением по опорной поверхности. Перемещение устройства обеспечивалось программным управлением. Динамику описали в виде уравнений Аппеля. Для вычислений использовали математические модели, по-разному учитывающие трение. Координация действий механизма формировалась на динамическом уровне. Управляющие воздействия — моменты двигателей колес. При визуализации исследуемых моделей задействовали встроенные численные методы системы Wolfram Mathematica («Вольфрам математика») с минимальной точностью 10^{-6}.
Результаты исследования. При построении математической модели определили равенства для угловых скоростей колес. Учли наличие площадки контакта и вывели уравнения динамики робота с дифференциальным приводом. Элементами системы были проекции силы и момент, показатели верчения платформы, массы, угловые ускорения и инерция колес. Показали, как формируются управляющие воздействия в рамках неголономной механики. Описали модель двигателей, которые создают момент управления на ведущих колесах. Вывели решение как взаимосвязь индуктивности проводников электродвигателей и работы электропитания. Детально рассмотрели три модели, описывающие динамику робота с дифференциальным приводом. Первая — неголономная. Вторая и третья включали систему уравнений динамики робота с дифференциальным приводом для общего случая, при наличии площадки контакта. При этом во второй модели игнорируется время переключений в двигателе и задействуется трение Кулона. В третьей ввели параметр, определяющий скорость переходных процессов в двигателе, и задействовали разложения Паде. Это модель с поликомпонентным трением. Итоги расчетов показали в виде графиков. На них исследуемые модели визуализировали в виде кривых разного цвета. Сопоставление графиков показало, в каких случаях после завершения переходных процессов управление обеспечит требуемую точность.
Это модели 1 и 2. В модели 3 программное управление генерирует ошибку в угловой скорости вращения платформы. Данную ошибку нельзя спрогнозировать в рамках 1-й и 2-й модели. Во всех рассмотренных системах

скорость скольжения колес в поперечном направлении падает до нуля. Получено и обосновано условие безотрывного движения опорного колеса.
Обсуждение и заключение. Программное управление допустимо в моделях, не учитывающих трение колес при одновременном скольжении, верчении и качении (общий случай пространственного движения). Однако важно учитывать взаимосвязь данных процессов и поликомпонентного трения. Это необходимо для более точного выполнения роботом программных движений. Установлено, что программное управление в модели, учитывающей трение верчения и качения, приводит к отклонениям от программных значений угловой скорости платформы. Полученные результаты можно использовать при построении системы управления с прогнозирующими моделями.

Ключевые слова: программное управление роботом, управление в неголономной механике, модель трения Кулона, поликомпонентное трение, ошибка угловой скорости вращения

Благодарности. Авторы выражают признательность кафедре «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за помощь в подготовке статьи. Благодарим рецензентов за конструктивную критику и предложения, которые способствовали значительному повышению качества статьи.

Для цитирования. Салимов М.С., Меркурьев И.В. Программное управление движением робота с дифференциальным приводом при разных моделях трения. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):346–355. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-346-355

Original article

Software Control of the Movement of a Differential Drive Robot for Different Friction Models

Maksim S. Salimov ✉, **Igor V. Merkuryev**
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation
✉ SalimovMS@mpei.ru

Abstract
Introduction. Designing motion control systems for mobile robots requires the construction of mathematical models. Researchers have repeatedly addressed this topic. In particular, works have been published on the calculations of multiphysical processes, modeling the movement of various types of wheels under certain conditions. In addition, the dynamics of deformable contacting bodies during sliding, rolling and rotation, issues of autonomy and controllability of mobile robots were considered. Note, however, that the dynamics and positioning accuracy of wheeled robots is largely determined by friction. The literature does not present studies on the dynamics of a robot with a differential drive taking into account the interrelationships of sliding, spinning and rolling friction effects based on the theory of multicomponent friction. Research in this area can reveal new dynamic effects. Based on the data obtained in this way, it is possible to improve the accuracy of positioning in building mathematical control models. The presented work aims at investigating the movement of an automatic device with a differential drive taking into account three contact models: nonholonomic, Coulomb friction, and multicomponent models.
Materials and Methods. The scheme of a two-wheeled robot with differential drive and continuous movement on the support surface was adopted as the basic one. The movement of the device was provided through software control. The dynamics was described in the form of Appel equations. Mathematical models were used for calculations, taking into account friction in different ways. Coordination of the actions of the mechanism was formed at a dynamic level. The control actions were the moments of the wheel motors. When visualizing the models under study, the built-in numerical methods of the Wolfram Mathematica system were used with a minimum accuracy of 10^{-6}.
Results. When building a mathematical model, the equations for the angular velocities of the wheels were determined. The authors took into account the presence of a contact site and derived the equations of dynamics of a differential drive robot. The elements of the system were force and moment projections, indicators of platform spin, masses, angular accelerations, and inertia of the wheels. It was shown how control actions were formed within the framework of nonholonomic mechanics. The model of engines that created a moment of control on the driving wheels was described. The solution was derived as the relationship between the inductance of the conductors of electric motors and the operation of the power supply. Three models describing the dynamics of a differential drive robot were examined in detail. The first model was nonholonomic. The second and third included a system of equations for the dynamics of a differential drive robot for a general case with a contact platform. At the same time, in the second model, the switching time in the engine was ignored and the Coulomb friction was involved. In the third model, a parameter to determine the speed of transients in the engine was introduced, and Pade decomposition was involved. This was a model with multicomponent friction. The calculation results were shown in the form of graphs. On them, the studied models were visualized in the form of curves of different colors. Comparison of the graphs showed in which cases, after the completion of transients, the control provided the required accuracy. These were models 1 and 2. In model 3, the

software control generated an error in the angular velocity of rotation of the platform. This error could not be predicted within the framework of the 1st and 2nd models. In all the systems considered, the sliding speed of the wheels in the transverse direction dropped to zero. The condition of continuous motion of the support wheel was obtained and validated.
Discussion and Conclusion. Software control is acceptable in models that do not take into account wheel friction during simultaneous sliding, spinning and rolling (general case of spatial motion). However, it is important to consider the relationship between these processes and multicomponent friction. This is required for the robot to perform program movements more accurately. It was established that software control in a model that takes into account the friction of spinning and rolling caused deviations from the program values of the angular velocity of the platform. The results obtained can be used in the building of a control system with predictive models.

Keywords: software control of a robot, control in nonholonomic mechanics, Coulomb friction model, multicomponent friction, error in angular velocity of rotation

Acknowledgements. The authors appreciate the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, National Research University MPEI, for assistance in preparing the article. We would like to thank the reviewers for their criticism and suggestions, which contributed to a significant improvement in the quality of the article.

For citation. Salimov MS, Merkuryev IV. Software Control of the Movement of a Differential Drive Robot for Different Friction Models. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):346–355. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-346-355

Введение. В современном мире растет востребованность автоматических мобильных колесных аппаратов, активно исследуются возможности координации их работы. Значительный научный и прикладной интерес имеют вопросы автономности и управляемости мобильных роботов. В частности, рассматриваются подходы к расчетам мультифизических процессов, моделированию движения конкретных видов колес в разных условиях. Некоторые изыскания фокусируются на динамике деформируемых контактирующих тел при скольжении, качении и вращении. Результаты этих исследований находят применение в робототехнике [1–3]. Управление мобильными колесными аппаратами рассматривается на примере электрических самокатов «Сигвей» (Segway) [4].

Мобильные механизмы с простыми и эффективными системами управления движением колес нужны в первую очередь для работы в узких пространствах [5], для проведения исследований в сложных промышленных условиях [6].

В [7–11] показаны возможности точного моделирования динамики колесных аппаратов с учетом скольжения, верчения и качения колес.

При этом в литературе не описаны явления, возникающие при комбинации эффектов трения. Цель представленной работы — исследовать влияние поликомпонентного трения на динамику робота с дифференциальным приводом. Задачи: построить математическую модель движения робота с поликомпонентным трением и смоделировать программные движения.

Материалы и методы. Рассматривается схема двухколесного робота с дифференциальным приводом (рис. 1). Предполагается безотрывное движение колес радиуса R по опорной поверхности.

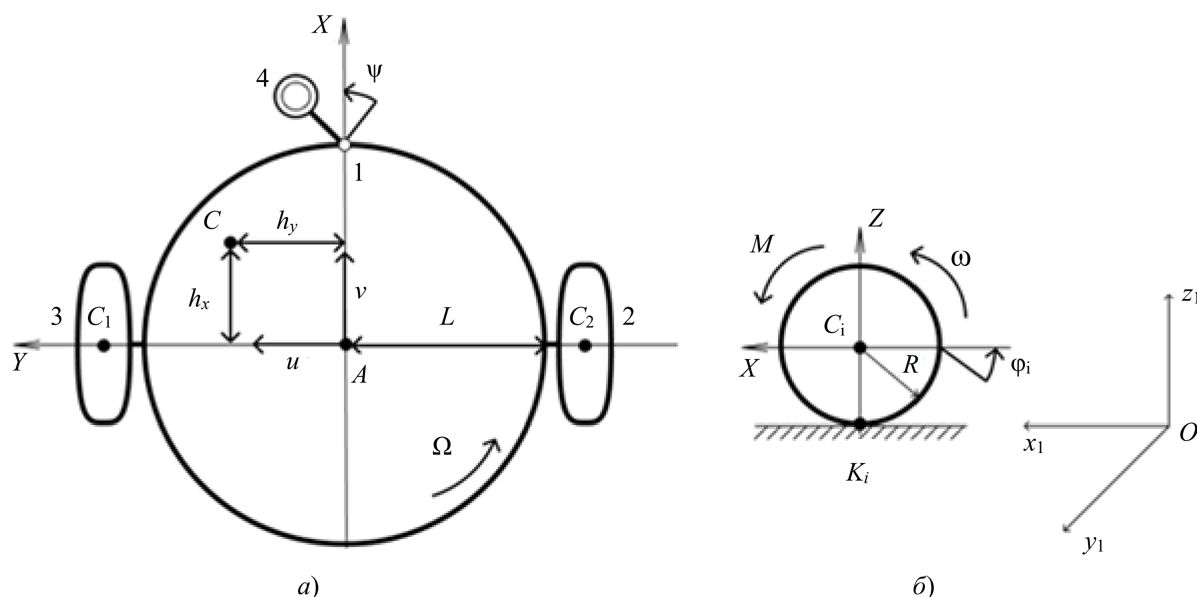


Рис. 1. Кинематическая схема робота: *а* — платформа; *б* — одно из ведущих колес

Центр тяжести платформы C смещен относительно геометрического центра платформы A по оси X на расстояние h_x, по оси Y — на расстояние h_y. Точки C_1 и C_2 — центры масс колес (индекс 1 соответствует левому колесу, индекс 2 — правому).

Вводятся следующие обозначения: m_1 — масса платформы робота; J_{Cz} — момент инерции платформы относительно центра масс C; O_1, x_1, y_1 — неподвижная система координат; x_A, y_A определяют положение точки A в O_1, x_1, y_1; ψ — угол курса платформы; φ_i — углы поворота колес (индекс 1 соответствует левому колесу, индекс 2 — правому); $AC_1 = AC_2 = L$ — расстояние между колесами; M_1, M_2 — моменты двигателей, приложенные к колесам.

Предполагается, что на опорное колесо 4 (рис. 1) действует только нормальная реакция опоры. Во время движения опорное колесо располагается на оси X на расстоянии R_0 от центра платформы ($R_0 < L$).

Результаты исследования

Математическая модель динамики робота. При описании движения робота с дифференциальным приводом в рамках неголономной механики применяются выражения, которые учитывают ограничения, связанные с отсутствием скольжения колес по отношению к поверхности:

$$\upsilon_{K_1x} = 0, \upsilon_{K_2x} = 0, \upsilon_{K_1y} = 0, \upsilon_{K_2y} = 0, \qquad (1)$$

где $\upsilon_{K_1x}, \upsilon_{K_2x}, \upsilon_{K_1y}, \upsilon_{K_2y}$ — проекции на оси X и Y скоростей точек K_1 и K_2, являющихся центрами площадок контакта колес с опорной поверхностью.

Отметим, что для неголономной модели предполагается точечный контакт колес с поверхностью, т.е. площадка контакта каждого колеса вырождается в единственную точку контакта.

Рассмотрим выражения:

$$\begin{aligned}
\upsilon_{K_1x} &= \upsilon - \Omega L - R\omega_1, \\
\upsilon_{K_2x} &= \upsilon + \Omega L - R\omega_2, \\
\upsilon_{K_1y} &= \upsilon_{K_2y} = \upsilon_{Cy} = u.
\end{aligned} \qquad (2)$$

С их помощью можно получить равенства для угловых скоростей колес:

$$\omega_1 = \frac{\upsilon - \Omega L}{R}, \omega_2 = \frac{\upsilon + \Omega L}{R}. \qquad (3)$$

В общем случае, когда предполагается наличие площадки контакта, получим уравнения динамики робота с дифференциальным приводом:

$$\begin{aligned}
& m_1\left[\dot{\upsilon} - h_y\dot{\Omega} - \Omega\left(u + h_x\Omega\right)\right] + 2m_\kappa\left(\dot{\upsilon} - \Omega u\right) = F_{\parallel_1}\cos\alpha_1 + F_{\parallel_2}\cos\alpha_2 - F_{\perp_1}\sin\alpha_1 - F_{\perp_2}\sin\alpha_2, \\
& m_1\left[\dot{u} + h_x\dot{\Omega} + \Omega\left(\upsilon - h_y\Omega\right)\right] + 2m_\kappa\left(\dot{u} + \Omega\upsilon\right) = F_{\parallel_1}\sin\alpha_1 + F_{\parallel_2}\sin\alpha_2 - F_{\perp_1}\cos\alpha_1 - F_{\perp_2}\cos\alpha_2, \\
& \dot{\Omega}\left(J_{Cz} + 2J_{Kz} + m_1\left(h_x^2 + h_y^2\right) + 2m_\kappa L^2\right) + m_1\left[\left(\dot{u} + \Omega\upsilon\right)h_x - h_y\left(\dot{\upsilon} - \Omega u\right)\right] = \\
& M_{C_1} + M_{C_2} + \left(F_{\parallel_2}\cos\alpha_2 - F_{\perp_2}\sin\alpha_2 - F_{\parallel_1}\cos\alpha_1 + F_{\perp_1}\sin\alpha_1\right)L, \\
& J_{Ky}\dot{\omega}_1 = M_1 - M_{y_1} - \left(F_{\parallel_1}\cos\alpha_1 - F_{\perp_1}\sin\alpha_1\right)R, \\
& J_{Ky}\dot{\omega}_2 = M_2 - M_{y_2} - \left(F_{\parallel_2}\cos\alpha_2 - F_{\perp_2}\sin\alpha_2\right)R.
\end{aligned} \qquad (4)$$

Здесь $F_{\parallel_1}, F_{\parallel_2}$ — проекции силы трения на направления скоростей скольжения центров пятен контакта колес; $F_{\perp_1}, F_{\perp_2}$ — проекции силы трения на направления, перпендикулярные скоростям центров пятен контакта колес; M_{c_1}, M_{c_2} — слагаемые момента трения при верчении для двух колес; $\dot{\Omega}$ — угловое ускорение верчения платформы; $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2$ — угловые ускорения колес, проецируемые на их ось вращения; m_K — масса каждого колеса; J_{Ky} и J_{Kz} — моменты инерции колеса относительно соответствующих осей.

Для формирования управляющих воздействий будем использовать модель динамики робота, описанного в рамках неголономной механики [12]:

$$m_1\left[\dot{\upsilon} - h_y\dot{\Omega} - \Omega h_x\Omega\right] + 2m_\kappa\dot{\upsilon} + \frac{2J_{Ky}}{R^2}\dot{\upsilon} = \frac{M_1 + M_2}{R},$$

$$m_1\left[\left(+h_x\dot{\Omega}+\Omega\left(\upsilon-h_y\Omega\right)\right)h_x-h_y\left(\dot{\upsilon}-h_y\dot{\Omega}-\Omega h_x\Omega\right)\right]+$$
$$\dot{\Omega}\left(J_{Cz}+2J_{Kz}+m_1\left(h_x^2+h_y^2\right)+2m_\kappa L^2\right)+2J_{Ky}\frac{L^2}{R^2}\dot{\Omega}=\frac{\left(M_2-M_1\right)L}{R}. \quad (5)$$

Ее также можно представить в виде:

$$F_\upsilon=\frac{M_1+M_2}{R}, M_\Omega=\frac{\left(M_2-M_1\right)L}{R}, \quad (6)$$

где F_υ и M_Ω — левые части уравнения (5).

Модель двигателей на ведущих колесах. Опишем модель двигателей, способных генерировать момент управления на ведущих колесах M_1, M_2.

Уравнения движения колесных двигателей постоянного тока можно выразить формулами [13]:

$$L_e\frac{d\left(i_k\right)}{dt}+Ri_k=U_k-c_1\omega_k,$$
$$M_k=c_2i_k, \left(k=1,2\right). \quad (7)$$

Здесь L_e — индуктивность проводников электродвигателей; R — сопротивление электрическому току в цепи двигателя; U_k — электропитание для двигателя k; i_k — ток, проходящий через цепь якоря двигателя; c_1, c_2 — конструкционные постоянные двигателей.

Предполагается, что двигатели ведущих колес имеют одинаковую характеристику. Из (7) видно, что

$$i_k=\frac{M_k}{c_2}. \quad (8)$$

Учитывая (8), в первом уравнении из системы (7) получим дифференциальное уравнение относительно момента M_κ :

$$\frac{L_e}{c_2}\dot{M}_k+\frac{R}{c_2}M_k=U_k-c_1\omega_k. \quad (9)$$

Уравнение (9) разделим на множитель $\frac{R}{c^2}$ и получим:

$$\frac{L_ec_2}{c_2R}\dot{M}_k+M_k=\frac{c_2}{R}U_k-\frac{c_1c_2}{R}\omega_k. \quad (10)$$

Введем обозначения:

$$T_1=\frac{L_ec_2}{c_2R}, K_1=\frac{c_1c_2}{R}, K_2=\frac{c_2}{R}. \quad (11)$$

В таком случае управляющие моменты можно описать:

$$T_1\dot{M}_k+M_k=K_2U_k-K_1\omega_k, \quad (12)$$

где K_1, K_2 — константы; T_1 — параметр, определяющий скорость переходных процессов в электрической части двигателей.

При игнорировании времени переключений в электромеханической системе двигателя:

$$M_k=K_2U_k-K_1\omega_k. \quad (13)$$

Авторы [14] получили похожие формулы.

Исследуемые модели. Рассмотрим модели, описывающие динамику робота с дифференциальным приводом.

Модель 1 описывается уравнениями (6) и (12), когда длительность переходных процессов полагается исчезающе малой $T_1=0$:

$$m_1\left[\dot{\upsilon}-h_y\dot{\Omega}-\Omega h_x\Omega\right]+2m_\kappa\dot{\upsilon}+\frac{2J_{Ky}}{R^2}\dot{\upsilon}=\frac{K_2U_1-K_1\omega_1+K_2U_2-K_1\omega_2}{R},$$
$$m_1\left[\left(+h_x\dot{\Omega}+\Omega\left(\upsilon-h_y\Omega\right)\right)h_x-h_y\left(\dot{\upsilon}-h_y\dot{\Omega}-\Omega h_x\Omega\right)\right]+2J_{Ky}\frac{L^2}{R^2}\dot{\Omega}+$$
$$+\dot{\Omega}\left(J_{Cz}+2J_{Kz}+m_1\left(h_x^2+h_y^2\right)+2m_\kappa L^2\right)=\frac{\left(\left(K_2U_2-K_1\omega_2\right)-\left(K_2U_1-K_1\omega_1\right)\right)L}{R}. \quad (14)$$

Здесь ω_1, ω_2 вычисляются по формулам (3).

Для описания модели 2 применяются уравнения (4), (13), а также модель трения Кулона:

$$F_{\|_i}=-fN_i, F_{\perp_i}=0, M_{C_i}=0. \quad (15)$$

Модель 3 представлена уравнениями (4), (12). Кроме того, учитывается поликомпонентное трение, представленное в [12] с помощью разложений Паде:

$$F_{\|_i} = -fN_i \frac{\sqrt{\upsilon_{K_ix}^2+\upsilon_{K_iy}^2} + k_r I_1 I_2 \Omega \frac{2I_1 - k_r I_2 \cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)}{I_0}\cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)}{\sqrt{\upsilon_{K_ix}^2+\upsilon_{K_iy}^2} + \frac{2I_1 - k_r I_2 \cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)}{I_0}|\Omega|}, \tag{16}$$

$$F_{\perp_i} = -fN_i \frac{k_r \pi \Omega}{k_r I_1 I_2 \frac{2I_1 - k_r I_2 \cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)}{I_0}\cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\sqrt{\upsilon_{K_ix}^2+\upsilon_{K_iy}^2} + |\Omega|}, \tag{17}$$

$$M_{C_i} = -2f\pi I_2 \frac{\frac{k_r I_3 \cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)}{2I_2}\left(\frac{2I_2}{I_3} - k_r \cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\right)\sqrt{\upsilon_{K_ix}^2+\upsilon_{K_iy}^2} + \Omega}{\left(\frac{2I_2}{I_3} - k_r \cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\right)\sqrt{\upsilon_{K_ix}^2+\upsilon_{K_iy}^2} + |\Omega|}, \tag{18}$$

$$M_{\perp_i} = -k_r \pi I_3 \frac{\omega_i}{|\omega_i|}. \tag{19}$$

Здесь I_1, I_2, I_3 — постоянные величины, которые находятся по формулам в [12]; α — угол, характеризующий направление линейных скоростей скольжения относительно точек контакта колес K_1, K_2; k_r — коэффициент, знак которого зависит от направления качения.

Для определения программного управления следует указать законы движения робота $\upsilon^d(t), \Omega^d(t)$. По (5) можно выразить величины $F_\upsilon = F_\Omega^d(t)$, $F_\upsilon = F_\Omega^d(t)$, $M_\Omega = M_\Omega^d(t)$ в зависимости от времени. Используем известные значения F_υ, M_Ω для вычисления управляющих напряжений U_1 и U_2, подаваемых на приводы колес:

$$U_2 = \frac{1}{K_2}\left(\frac{R}{2}\left(F_\upsilon + \frac{M_\Omega}{L}\right) + K_1\omega_2\right), U_1 = \frac{1}{K_2}\left(\frac{R}{2}\left(F_\upsilon - \frac{M_\Omega}{L}\right) + K_1\omega_1\right). \tag{20}$$

Движение системы с заданными начальными условиями $\upsilon(0) = 0,5\frac{м}{c}, u(0) = 0,2\frac{м}{c}, \Omega(0) = 0,2\frac{1}{c}$ смоделировали в математическом пакете «Вольфрам математика» (Wolfram Mathematica).

Рассмотрим $\upsilon^d(t) = 0,5\ \frac{m}{c}, \Omega^d(t) = 0,3\frac{1}{c}$. Для интеграции системы автоматически выбирали шаг интегрирования и задействовали встроенные численные методы Wolfram Mathematica с точностью результатов не менее 10^{-6}.

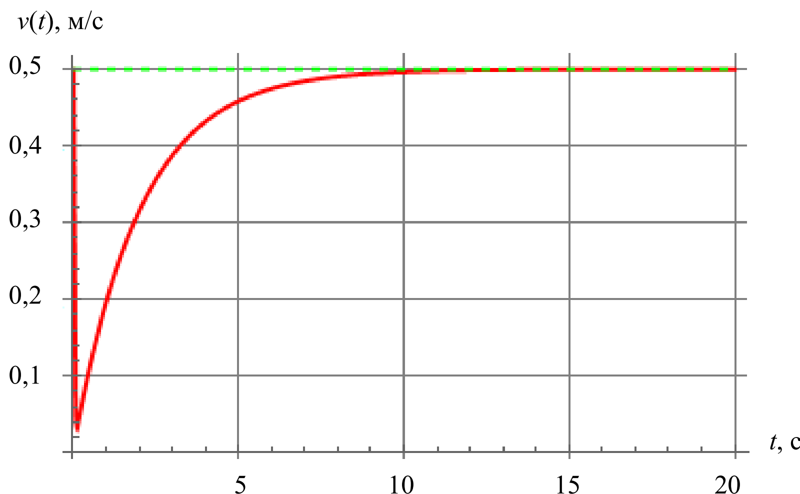


Рис. 2. Зависимость продольной скорости υ. Зеленая кривая — неголономная модель 1, красная кривая — модель 2 с трением Кулона, синяя кривая — модель 3 с поликомпонентным трением. Синяя и красная кривые совпадают

Механика

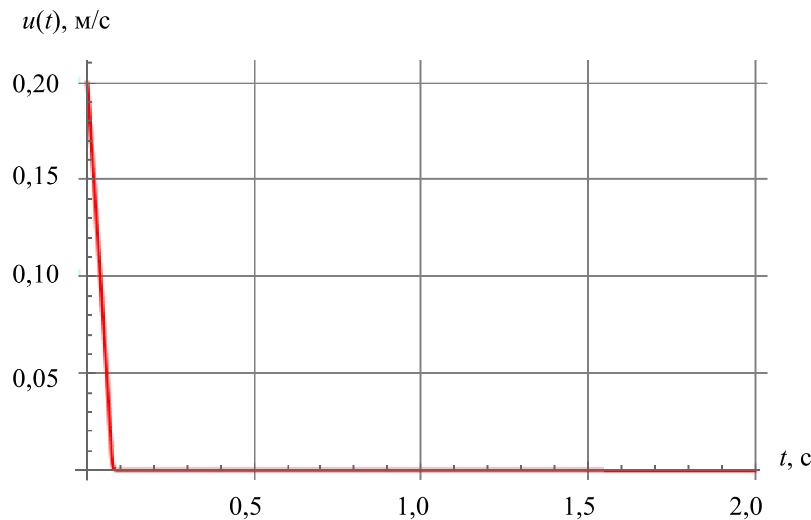


Рис. 3. Зависимость поперечной скорости *u*. Зеленая кривая — неголономная модель 1, красная кривая — модель 2 с трением Кулона, синяя кривая — модель 3 с поликомпонентным трением. Зеленая, синяя и красная кривые совпадают

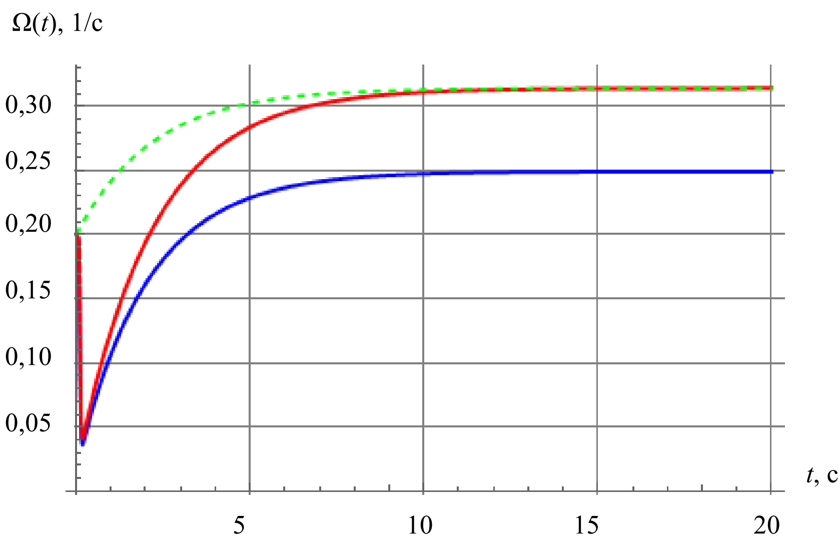


Рис. 4. Зависимость угловой скорости робота. Зеленая кривая — неголономная модель 1, красная кривая — модель 2 с трением Кулона, синяя кривая — модель 3 с поликомпонентным трением

Из рис. 2 и 4 видно, что управление гарантирует точную реализацию программных законов движения после завершения переходных процессов в моделях 1 (неголономная) и 2 (с трением Кулона). В модели 3 (поликомпонентное трение скольжения, качения и верчения) после завершения переходных процессов из-за программного управления возникает постоянная ошибка в угловой скорости вращения платформы. Во всех рассмотренных моделях скорость скольжения колес в поперечном направлении быстро снижается до нуля. Случаи совпадения зависимостей, полученных для разных моделей, показаны на рис. 2 и 3.

Для проверки выполнения условий безотрывного движения опорного колеса запишем теорему изменения кинетического момента системы в проекциях на ось *Y*:

$$J_{Ky}(\dot{\omega}_1+\dot{\omega}_2)=M_1+M_2-M_{y_1}-M_{y_2}-N_3R_0+m_1gh_x-\left(F_{\parallel_1}\cos\alpha_1-F_{\perp_1}\sin\alpha_1+F_{\parallel_2}\cos\alpha_2-F_{\perp_2}\sin\alpha_2\right)R.$$

Согласно (4):

$$M_1+M_2=-N_3R_0+m_1gh_x.$$

Из последнего уравнения получаем условие безотрывного движения опорного колеса:

$$m_1gh_x-(M_1+M_2)>0.$$

С учетом (5):

$$m_1gh_x-R(m_1+2m_k+\frac{2J_{Ky}}{R^2})\dot{\upsilon}+Rm_1[h_y\dot{\Omega}+h_x\Omega^2]>0.$$

Ускорения робота не превышали 1 м/с^2, поэтому данное неравенство выполняется в каждый момент времени.

Обсуждение и заключение. Итоги моделирования позволили сделать ряд выводов. Программное управление, основанное на неголономной модели 1, приемлемо для роботов, конструкция которых не учитывает контактное трение колес, возникающее при комбинации скольжения, верчения и качения. Однако при формировании управляющих воздействий для достижения более точного следования программным законам движения необходимо учитывать модель поликомпонентного трения. Полученное решение можно использовать при построении системы управления с прогнозирующей моделью (model predictive control). Такая разработка будет предметом дальнейшего исследования.

Список литературы

1. Gerasimov K.V., Zobova A.A., Kosenko I.I. Omni-Vehicle Dynamical Models Mutual Matching for Different Roller-Floor Contact Models. In: *Proc. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering "Multibody Dynamics"*. Cham: Springer; 2019. P. 511–517. http://doi.org/10.1007/978-3-030-23132-3_61

2. Zobova A.A., Habra T., Van der Noot N., Dallali H., Tsagarakis N.G., Fisette P., et al. Multi-Physics Modelling of a Compliant Humanoid Robot. *Multibody System Dynamics*. 2017;39:95–114. https://doi.org/10.1007/s11044-016-9545-4

3. Gerasimov K.V., Zobova A.A. On the Motion of a Symmetrical Vehicle with Omniwheels with Massive Rollers. *Mechanics of Solids*. 2018;53:32–42. https://doi.org/10.3103/S0025654418050060

4. Corke P. Robot Arm Kinematics. In book: *Robotics, Vision and Control*, 2nd ed. Cham: Springer; 2017. P. 193–228. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7_7

5. Junjie Shen, Dennis Hong. OmBURo: A Novel Unicycle Robot with Active Omnidirectional Wheel. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (*ICRA*). New York City: IEEE; 2020. P. 11–19. https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196927

6. Munitsyn L.V. Vibrations of a Rigid Body with Cylindrical Surface on a Vibrating Foundation. *Mechanics of Solids*. 2017;52:675–685. https://doi.org/10.3103/S0025654417060073

7. Goryacheva I.G., Zobova A.A. Dynamics of Deformable Contacting Bodies with Sliding, Rolling, and Spinning. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2022;216:106981. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106981

8. Zobova A.A., Goryacheva I.G. Effect of Contacting Bodies' Mechanical Properties on the Dynamics of a Rolling Cylinder. *Acta Mechanica*. 2020;232:1971–1982. http://doi.org/10.1007/s00707-020-02800-w

9. Киреенков А.А., Жаворонок С.И., Нуштаев Д.В. О моделях шины, учитывающих как деформированное состояние, так и эффекты сухого трения в области контакта. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2021;13(1):163–173. https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-1-163-173

10. Kireenkov A.A., Zhavoronok S.I. Coupled Dry Friction Models in Problems of Aviation Pneumatics' Dynamics. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;127:198–203. http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.02.004

11. Kireenkov A.A., Fedotenkov G.V., Shiriaev A., Zhavoronok S.I. Application of the Theory of the Multicomponent Dry Friction in Some of Control Robot Systems. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2022;18(1):14–23. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-14-23

12. Salimov M.S., Saypulaev G.R., Merkuriev I.V. Four-Dimensional Integral Model of Dry Friction on the Example of Wheel Movement. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;2096:012043. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012043

13. Alaci S., Ciornei F.C., Pentiuc R.D., Ciornei M.C., Romȃnu I.C. Indetermination versus Incompatibility in Dynamic Systems with Dry Friction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1426:012011. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012011

14. Long Chen, Jun Liu, Hai Wang, Youhao Hu, Xuefeng Zheng, Mao Ye, et al. Robust Control of Reaction Wheel Bicycle Robot via Adaptive Integral Terminal Sliding Mode. *Nonlinear Dynamics*. 2021;104:2291–2302. https://doi.org/10.1007/s11071-021-06380-9

References

1. Gerasimov KV, Zobova AA, Kosenko II. Omni-Vehicle Dynamical Models Mutual Matching for Different Roller-Floor Contact Models. In: *Proc. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering "Multibody Dynamics"*. Cham: Springer; 2019. P. 511–517. http://doi.org/10.1007/978-3-030-23132-3_61

2. Zobova AA, Habra T, Van der Noot N, Dallali H, Tsagarakis NG, Fisette P, et al. Multi-Physics Modelling of a Compliant Humanoid Robot. *Multibody System Dynamics*. 2017;39:95–114. https://doi.org/10.1007/s11044-016-9545-4

3. Gerasimov KV, Zobova AA. On the Motion of a Symmetrical Vehicle with Omniwheels with Massive Rollers. *Mechanics of Solids*. 2018;53:32–42. https://doi.org/10.3103/S0025654418050060

4. Corke P. Robot Arm Kinematics. In book: *Robotics, Vision and Control*, 2nd ed. Cham: Springer; 2017. P. 193–228. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7_7

5. Junjie Shen, Dennis Hong. OmBURo: A Novel Unicycle Robot with Active Omnidirectional Wheel. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (*ICRA*). New York City: IEEE; 2020. P. 11–19. https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196927

6. Munitsyn LV. Vibrations of a Rigid Body with Cylindrical Surface on a Vibrating Foundation. *Mechanics of Solids*. 2017;52:675–685. https://doi.org/10.3103/S0025654417060073

7. Goryacheva IG, Zobova AA. Dynamics of Deformable Contacting Bodies with Sliding, Rolling, and Spinning. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2022;216:106981. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106981

8. Zobova AA, Goryacheva IG. Effect of Contacting Bodies' Mechanical Properties on the Dynamics of a Rolling Cylinder. *Acta Mechanica*. 2020;232(5):1971–1982. http://doi.org/10.1007/s00707-020-02800-w

9. Kireenkov AA, Zhavoronok SI, Nushtaev DV. On Tire Models Accounting for Both Deformed State and Coupled Dry Friction in a Contact Spot. *Computer Research and Modeling*. 2021;13(1):163–173. https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-1-163-173

10. Kireenkov AA, Zhavoronok SI. Coupled Dry Friction Models in Problems of Aviation Pneumatics' Dynamics. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;127:198–203. http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.02.004

11. Kireenkov AA, Fedotenkov GV, Shiriaev A, Zhavoronok SI. Application of the Theory of the Multicomponent Dry Friction in Some of Control Robot Systems. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2022;18(1):14–23. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-14-23

12. Salimov MS, Saypulaev GR, Merkuriev IV. Four-Dimensional Integral Model of Dry Friction on the Example of Wheel Movement. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;2096:012043. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012043

13. Alaci S, Ciornei FC, Pentiuc RD, Ciornei MC, Românu IC. Indetermination versus Incompatibility in Dynamic Systems with Dry Friction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1426:012011. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012011

14. Long Chen, Jun Liu, Hai Wang, Youhao Hu, Xuefeng Zheng, Mao Ye, et al. Robust Control of Reaction Wheel Bicycle Robot via Adaptive Integral Terminal Sliding Mode. *Nonlinear Dynamics*. 2021;104:2291–2302. https://doi.org/10.1007/s11071-021-06380-9

Поступила в редакцию 20.09.2023
Поступила после рецензирования 18.10.2023
Запланирована в номер 07.11.2023

Об авторах

Максим Сергеевич Салимов, ассистент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), SPIN-код: 7721-7434, ORCID, SalimovMS@mpei.ru

Игорь Владимирович Меркурьев, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), SPIN-код: 1608-9638, ScopusID, ORCID, MerkuryevIV@mpei.ru

Заявленный вклад соавторов

М.С. Салимов — формирование цели и задачи исследования, подготовка текста, расчеты.
И.В. Меркурьев — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 20.09.2023
Revised 20.10.2023
Accepted 07.11.2023

About the Authors:

Maksim S. Salimov, Teaching assistant of Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, National Research University MPEI (14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, RF), SPIN-code: 7721-7434, ORCID, SalimovMS@mpei.ru

Igor V. Merkuryev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, National Research University MPEI (14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, RF), SPIN-code: 1608-9638, ScopusID, ORCID, MerkuryevIV@mpei.ru

Claimed contributorship:

MS Salimov: research objectives and tasks formulation, text preparation, computational analysis.

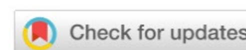
IV Merkuryev: academic advising, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МЕХАНИКА
MECHANICS





УДК 531.133.1
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-356-364

Научная статья



EDN: IQHEGM

Анализ точности позиционирования при конструкционных погрешностях в установке меканум-колёс мобильной платформы

Г.В. Панкратьева, А.Е. Мордин, Г.Р. Сайпулаев ✉
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Российская Федерация
✉ saypulaevgr@mail.ru

Аннотация
Введение. Мобильные роботы, способные осуществлять всенаправленное движение, широко применяются в различных областях человеческой деятельности. Для обеспечения высокой точности позиционирования всенаправленных платформ с меканум-колёсами требуется разработать их детальные математические модели, используемые при построении системы управления движением. Из-за непростой конструкции меканум-колёс при построении всенаправленных платформ могут возникать различные погрешности, включая погрешность установки таких колёс на платформу. Влияние ее на точность движения платформы ранее не исследовалось. Целью данной работы является оценка ошибок позиционирования, возникающих из-за наличия конструкционных погрешностей в установке меканум-колёс, и анализ влияния указанных погрешностей на точность отработки программного движения при использовании управления на кинематическом уровне.
Материалы и методы. Анализ точности позиционирования основан на математическом моделировании кинематики платформы с учетом конструкционных погрешностей в установке меканум-колёс. Для описания взаимосвязи между угловыми скоростями вращения колес и скоростями платформы используются условия непроскальзывания точек контакта по опорной поверхности. Численные расчеты проведены в математическом пакете *Wolfram Mathematica*.
Результаты исследования. Получена формула для оценки погрешностей псевдоскоростей платформы при программном управлении, формируемом на кинематическом уровне. Проведена оценка погрешностей скоростей платформы для простых движений. По результатам расчетов показано, что погрешности скоростей являются значительными для роботов с меканум-колёсами, функционирующих автономно.
Обсуждение и заключение. Результаты расчетов продемонстрировали существенное влияние погрешностей установки колес на точность позиционирования меканум-платформы и подтвердили необходимость учитывать указанные конструкционные погрешности при создании автономных меканум-платформ. Построенная модель кинематики робота позволяет прогнозировать ошибки отработки скоростей платформы, возникающие при программном управлении, а также отклонения координат геометрического центра платформы от программного движения. Кинематическая модель может быть использована для повышения точности позиционирования за счет формирования управления движением платформы, компенсирующего влияние неточностей установки меканум-колёс.

Ключевые слова: меканум-колесо, всенаправленная платформа, кинематическая модель, конструкционные погрешности, программное управление

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам за помощь в проведении исследования и работе над статьей.

Для цитирования. Панкратьева Г.В., Мордин А.Е., Сайпулаев Г.Р. Анализ точности позиционирования при конструкционных погрешностях в установке меканум-колёс мобильной платформы. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(4):356–364. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-356-364

Original article

Analysis of Positioning Accuracy in Case of Design Errors in the Installation of Mecanum Wheels of the Mobile Platform

Galina V. Pankrateva, Anton E. Mordin, Gasan R. Saypulaev ✉
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation
✉ saypulaevgr@mail.ru

Abstract
Introduction. Mobile robots capable of omnidirectional movement are widely used in various fields of human activity. To provide high accuracy of positioning of omnidirectional platforms with mecanum wheels, it is required to develop their detailed mathematical models used in the construction of a motion control system. Due to the complicated design of the mecanum wheels, various errors may occur during the construction of omnidirectional platforms, including the error of installing such wheels on the platform. Its effect on the accuracy of the platform movement has not been studied before. This work aims at assessing the positioning errors that arise due to the presence of design errors in the installation of mecanum wheels, and analyzing the effect of these errors on the accuracy of program motion testing when using control at the kinematic level.
Materials and Methods. The analysis of positioning accuracy was based on mathematical modeling of the platform kinematics, taking into account structural errors in the installation of mecanum wheels. To describe the relationship between the angular speeds of rotation of the wheels and the speeds of the platform, the conditions of nonslip of the contact points on the support surface were used. Numerical calculations were carried out in the *Wolfram Mathematica* package.
Results. A formula was obtained for estimating errors in platform pseudovelocities under program control formed at the kinematic level. The estimation of the errors of the platform speeds for simple movements was carried out. According to the calculation results, it has been shown that the speed errors are significant for robots with mecanum wheels operating autonomously.
Discussion and Conclusion. The calculation results demonstrated the significant impact of wheel installation errors on the positioning accuracy of the mecanum-platform, and confirmed the need to take into account these design errors when creating autonomous mecanum-platforms. The constructed model of the robot's kinematics makes it possible to predict errors in platform speeds that arise under program control, as well as deviations of the coordinates of the geometric center of the platform from the program motion. The proposed kinematic model can be used to improve the positioning accuracy through forming a platform motion control that compensates for the influence of wheel installation errors.

Keywords: mecanum wheel, omnidirectional platform, kinematic model, design errors, program control

Acknowledgements. The authors would like to thank their colleagues for their help in conducting the research and working on the article.

For citation. Pankrateva GV, Mordin AE, Saypulaev GR. Analysis of Positioning Accuracy in Case of Design Errors in the Installation of Mecanum Wheels of the Mobile Platform. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(4):356–364. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-356-364

Введение. Мобильные роботы (или всенаправленные платформы), способные осуществлять движение в любом направлении, широко применяются в военной, медицинской, образовательной и промышленной областях человеческой деятельности [1, 2]. Возможность всенаправленного движения может быть достигнута за счет оснащения мобильной платформы омни-колёсами различного вида (меканум-колёса, классические омни-колёса). Для обеспечения высокой точности позиционирования всенаправленных платформ требуется разработать их детальные математические модели, используемые при построении системы управления движением. Необходимость обеспечения высокой точности движения связана с потребностью обеспечить автономное функционирование всенаправленных платформ.

Зачастую при математическом моделировании кинематики меканум-колёс принимаются допущения, упрощающие описание движения таких колёс, об этом, например, идет речь в [3–5]. Так, в работах [3, 4] рассматривается динамика меканум-платформы с учетом сил сухого трения качения и условий непроскальзывания точек контакта, выражающихся неголономными связями. А в статье [5] отмечается, что интерес представляет исследование влияния конечных линейных размеров роликов и вибраций, связанных с этим эффектом, на динамику меканум-платформы.

Актуальными направлениями исследований всенаправленных колёс являются моделирование влияния конструкции роликов меканум-колёс и оптимизация формы роликов [6–9]. Необходимость оптимизации формы

роликов связана с тем, что при некоторых формах роликов омни-колёс могут возникать вертикальные вибрации точек контакта при движении всенаправленных платформ (подробнее см. в обзоре патентов [10]).

Другим фактором, существенно влияющим на точность позиционирования меканум-платформы, является проскальзывание точек контакта меканум-колёс с опорной поверхностью. Одним из способов учета проскальзывания точек контакта при описании кинематики является использование допущения, что скорость скольжения пропорциональна произведению угловой скорости вращения колеса и радиуса меканум-колеса, причем коэффициент пропорциональности считается постоянным [11, 12]. Это допущение позволяет свести уравнения кинематики к задаче с неголономными связями. Однако результаты экспериментов показывают, что указанный коэффициент изменяется при движении платформы [13, 14].

Стоит отметить, что из-за непростой конструкции меканум-колёс при построении меканум-платформ могут возникать различные погрешности изготовления, в том числе погрешность установки меканум-колёс на платформу, малые отклонения формы роликов и др. Влияние погрешностей установки меканум-колес на точность движения платформы ранее не исследовалось. В рамках данной работы будет исследовано влияние неточностей установки меканум-колёс на точность позиционирования всенаправленной платформы и её кинематику.

Для достижения поставленной в статье цели, то есть для оценки ошибок позиционирования, возникающих из-за конструкционных погрешностей в установке меканум-колёс, и анализа их влияния на точность движения всенаправленной меканум-платформы, необходимо построить математическую модель движения такой платформы с учетом конструкционных погрешностей в установке меканум-колёс. Полученная математическая модель позволит исследовать их влияние на точность позиционирования мобильной платформы. Эта модель может быть применена для формирования управления, компенсирующего погрешности позиционирования платформы.

Материалы и методы. Описание конструкции робота. Как основа для данного исследования рассматривается модель робота в виде прямоугольной платформы с четырьмя меканум-колёсами при его движении по горизонтальной плоскости (рис. 1). При этом учитываются погрешности, связанные с неортогональностью осей вращения колёс и продольной оси платформы.

Для описания кинематики робота вводится подвижная система координат $Cxyz$, связанная с платформой робота и началом в геометрическом центре платформы.

При математическом моделировании используются следующие обозначения: h — половина расстояния между осями колёсных пар (при ортогональных осях колёс); l — половина ширины платформы; x_i и y_i — абсцисса и ордината точк и D_i крепления привода i-го колеса к платформе; O_i — геометрический центр i-го меканум-колеса; V_L, V_T — продольная и поперечная скорости геометрического центра платформы; $s = |D_i O_i|$ — длина вала привода; Ω — угловая скорость верчения платформы; α_i — угол между осью Cx и осью вращения i-го колеса (параллельной вектору $\overrightarrow{D_i O_i}$) (рис. 1). Номера колёс платформы указаны на схеме на рис. 1, а эллипсами на колёсах показано расположение контактирующих роликов каждого колеса.

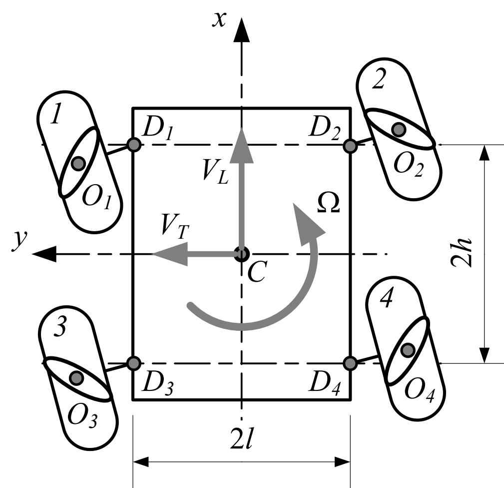


Рис. 1. Кинематическая схема платформы

Описание метода построения кинематической модели. Движение платформы будем описывать в рамках неголономной постановки задачи, используя упрощенную модель меканум-колёс: колесо моделируется диском радиусом R, а точка контакта может проскальзывать относительно направления, перпендикулярного оси контактирующего ролика. При этом в случае отсутствия погрешности в расположении осей колёс существует

связь между угловыми скоростями вращения колёс вокруг собственной оси $\dot{\varphi}_i$ и скоростями платформы V_L, V_T, Ω [15]:

$$\dot{\varphi}_i = \frac{1}{R}\left[V_L + V_T \tan\delta_i - \left(y_i - x_i \tan\delta_i\right)\Omega\right], \tag{1}$$

где δ_i — угол между направлением оси контактирующего ролика и плоскостью меканум-колеса.

Для исследования влияния конструкционных погрешностей необходимо описать зависимость между угловыми скоростями колёс $\dot{\varphi}_i$ и скоростями платформы V_L, V_T, Ω при учете погрешностей, связанных с расположением осей колёс. Параметры конструкции платформы и расположения колёс приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры конструкции платформы

i	x_i	y_i	δ_i	α_i	d_i
1	h	l	$-45°$	$90° + \Delta\alpha_1$	s
2	h	$-l$	$45°$	$-90° + \Delta\alpha_2$	$-s$
3	$-h$	l	$45°$	$90° + \Delta\alpha_3$	s
4	$-h$	$-l$	$-45°$	$-90° + \Delta\alpha_4$	$-s$

Здесь $\Delta\alpha_i$ — угол, характеризующий неортогональность осей колёс и продольной оси платформы Cx; d_i — проекция вектора $\overrightarrow{D_iO_i}$ на собственную ось вращения i-го колеса.

Результаты исследования. Описывая кинематику меканум-платформы в рамках неголономной механики, как это было сделано в работах [3–5], при отсутствии конструкционных погрешностей ($\Delta\alpha_i = 0$), определяем условие непроскальзывания точки контакта вдоль оси контактирующего ролика:

$$V_{K_ix}\cos\left(\delta_i + \Delta\alpha_i\right) + V_{K_iy}\sin\left(\delta_i + \Delta\alpha_i\right) = 0, \tag{2}$$

где V_{K_ix}, V_{K_iy} — проекции скорости точки K_i контакта i-го колеса с опорной поверхностью, которые определяются из векторного уравнения:

$$V_{K_i} = V_C + \Omega_P \times \overrightarrow{CO_i} + \omega_i \times \overrightarrow{O_iK_i}. \tag{3}$$

Здесь $V_{K_i} = \begin{bmatrix} V_{K_ix} & V_{K_iy} & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор скорости точки K_i контакта i-го колеса с опорной поверхностью в проекциях на оси подвижной системы координат $Cxyz$; $V_C = \begin{bmatrix} V_L & V_T & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор скорости геометрического центра платформы в проекциях на оси $Cxyz$; $\Omega_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Omega \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор угловой скорости платформы в проекциях на оси $Cxyz$; $\overrightarrow{CO_i} = \overrightarrow{CO_i} + \overrightarrow{O_iD_i} = \begin{bmatrix} x_i - d_i \sin\Delta\alpha_i & y_i + d_i\cos\Delta\alpha_i & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — радиус-вектор, соединяющий геометрические центры платформы C и i-го колеса O_i, в проекциях на оси $Cxyz$; $\omega_i = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_i \sin\Delta\alpha_i & \dot{\varphi}_i\cos\Delta\alpha_i & \Omega \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор угловой скорости в проекциях на оси $Cxyz$; $\overrightarrow{O_iK_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -R \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — радиус-вектор, соединяющий геометрический центр i-го колеса O_i и точку контакта ролика K_i.

Переписывая векторное уравнение (3) и используя кососимметрические матрицы для вычисления векторных произведений, перепишем уравнение (3) в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} V_{K_ix} \\ V_{K_iy} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_L \\ V_T \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\Omega & 0 \\ \Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_i - d_i\sin\Delta\alpha_i \\ y_i + d_i\cos\Delta\alpha_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\Omega & \dot{\varphi}_i\cos\Delta\alpha_i \\ \Omega & 0 & -\dot{\varphi}_i\sin\Delta\alpha_i \\ -\dot{\varphi}_i\cos\Delta\alpha_i & \dot{\varphi}_i\sin\Delta\alpha_i & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -R \end{bmatrix}. \tag{4}$$

После проведения вычислений:

$$\begin{aligned} V_{K_ix} &= V_L - \Omega\left(y_i + d_i\cos\Delta\alpha_i\right) - R\dot{\varphi}_i\cos\Delta\alpha_i, \\ V_{K_iy} &= V_T + \Omega\left(x_i - d_i\sin\Delta\alpha_i\right) - R\dot{\varphi}_i\sin\Delta\alpha_i. \end{aligned} \tag{5}$$

После переноса параметров платформы из таблицы 1 в уравнения связей (2) с учетом (5) их можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
\dot{\varphi}_1 &= \frac{1}{R}\left[V_L - V_T - (h+l)\Omega\right]\cos\Delta\alpha_1 + \frac{1}{R}\left[V_L + V_T + (h-l)\Omega\right]\sin\Delta\alpha_1 - \frac{s}{R}\Omega,\\
\dot{\varphi}_2 &= \frac{1}{R}\left[V_L + V_T + (h+l)\Omega\right]\cos\Delta\alpha_2 - \frac{1}{R}\left[V_L - V_T - (h-l)\Omega\right]\sin\Delta\alpha_2 + \frac{s}{R}\Omega,\\
\dot{\varphi}_3 &= \frac{1}{R}\left[V_L + V_T - (h+l)\Omega\right]\cos\Delta\alpha_3 - \frac{1}{R}\left[V_L - V_T + (h-l)\Omega\right]\sin\Delta\alpha_3 - \frac{s}{R}\Omega,\\
\dot{\varphi}_4 &= \frac{1}{R}\left[V_L - V_T + (h+l)\Omega\right]\cos\Delta\alpha_4 + \frac{1}{R}\left[V_L + V_T - (h-l)\Omega\right]\sin\Delta\alpha_4 + \frac{s}{R}\Omega.
\end{aligned} \quad (6)$$

Отметим, что в при отсутствии погрешностей крепления осей двигателей колёс $(\Delta\alpha_i = 0)$ уравнения (6) принимают вид:

$$\begin{aligned}
\dot{\varphi}_1^{ideal} &= \frac{1}{R}\left[V_L - V_T - (h+l)\Omega\right], \quad \dot{\varphi}_2^{ideal} = \frac{1}{R}\left[V_L + V_T + (h+l)\Omega\right],\\
\dot{\varphi}_3^{ideal} &= \frac{1}{R}\left[V_L + V_T - (h+l)\Omega\right], \quad \dot{\varphi}_4^{ideal} = \frac{1}{R}\left[V_L - V_T + (h+l)\Omega\right].
\end{aligned} \quad (7)$$

И совпадают с известными результатами [6].

В матричной форме уравнения (6) и (7) можно представить в виде:

$$\dot{q} = H(\Delta\alpha_i)\dot{\pi}, \quad (8)$$

$$\dot{q} = H_0\dot{\pi}, \quad (9)$$

где $\dot{\pi} = \left[V_L \quad V_T \quad \Omega\right]^{\mathrm{T}}$ — вектор псевдоскоростей платформы; $\dot{q} = \left[\dot{\varphi}_1 \quad \dot{\varphi}_2 \quad \dot{\varphi}_3 \quad \dot{\varphi}_4\right]^{\mathrm{T}}$ — вектор угловых скоростей колёс; $H(\Delta\alpha_i)$ — матрица коэффициентов при псевдоскоростях в уравнениях (6); а $H_0 = H(\Delta\alpha_i = 0)$.

При формировании управления на кинематическом уровне по желаемым значениям псевдоскоростей платформы $\dot{\pi}^d$ рассчитываются значения угловых скоростей платформы по формуле.

$$\dot{q}^d = H_0\dot{\pi}^d, \quad (10)$$

где верхний индекс d указывает на желаемые (программные) значения скоростей. Полученные значения угловых скоростей подаются на вход системе управления двигателями колёс.

Однако при наличии неточностей крепления осей двигателей колёс по результатам отработки программных значений угловых скоростей колёс будет реализовано движение платформы в виде:

$$\dot{\pi} = \left(H^{\mathrm{T}}(\Delta\alpha_i)H(\Delta\alpha_i)\right)^{-1}H^{\mathrm{T}}(\Delta\alpha_i)\dot{q}^d = \left(H^{\mathrm{T}}(\Delta\alpha_i)H(\Delta\alpha_i)\right)^{-1}H^{\mathrm{T}}(\Delta\alpha_i)H_0\dot{\pi}^d. \quad (11)$$

По найденному выражению можно оценить погрешность отработки программного движения платформы, обусловленную наличием неточностей крепления осей двигателей колёс, по формуле:

$$\Delta\dot{\pi} = \dot{\pi} - \dot{\pi}^d = \left[\left(H^{\mathrm{T}}(\Delta\alpha_i)H(\Delta\alpha_i)\right)^{-1}H^{\mathrm{T}}(\Delta\alpha_i)H_0 - E_3\right]\dot{\pi}^d, \quad (12)$$

где E_3 — единичная матрица порядка 3.

Поскольку псевдоскорости платформы связаны с координатами геометрического центра в неподвижной системе отсчета соотношениями [15],

$$\begin{aligned}
\dot{x}_C &= V_L\cos\psi - V_T\sin\psi,\\
\dot{y}_C &= V_L\sin\psi + V_T\cos\psi,\\
\dot{\psi} &= \Omega,
\end{aligned} \quad (13)$$

то, учитывая погрешности псевдоскоростей, можно переписать указанные выражения в виде:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_C &= \dot{x}_C^d\cos\Delta\psi - \dot{y}_C^d\sin\Delta\psi + \Delta V_L\cos\left(\psi^d + \Delta\psi\right) - \Delta V_T\sin\left(\psi^d + \Delta\psi\right),\\
\dot{y}_C &= \dot{x}_C^d\sin\Delta\psi + \dot{y}_C^d\cos\Delta\psi + \Delta V_L\sin\left(\psi^d + \Delta\psi\right) + \Delta V_T\cos\left(\psi^d + \Delta\psi\right),\\
\psi &= \psi^d + \Delta\psi,
\end{aligned} \quad (14)$$

где $\dot{x}_C^d = V_L^d\cos\psi^d - V_T^d\sin\psi^d$, $\dot{y}_C^d = V_L^d\sin\psi^d + V_T^d\cos\psi^d$ — законы изменения скоростей геометрического центра платформы в неподвижной системе отсчета, соответствующие программному движению;

$\psi^d = \psi^d(0) + \int_0^t \Omega^d(t_1)dt_1$ — закон изменения угла курса платформы, соответствующий программному движению; $\Delta\psi = \int_0^t \Delta\Omega(t_1)dt_1$ — погрешность угла курса.

С учетом введенных обозначений получим формулы для ошибок позиционирования в виде:

$$\Delta\dot{x}_C = \dot{x}_C^d\left(\cos\Delta\psi - 1\right) - \dot{y}_C^d \sin\Delta\psi + \Delta V_L \cos\left(\psi^d + \Delta\psi\right) - \Delta V_T \sin\left(\psi^d + \Delta\psi\right),$$
$$\Delta\dot{y}_C = \dot{x}_C^d \sin\Delta\psi + \dot{y}_C^d\left(\cos\Delta\psi - 1\right) + \Delta V_L \sin\left(\psi^d + \Delta\psi\right) + \Delta V_T \cos\left(\psi^d + \Delta\psi\right). \qquad (15)$$

В качестве числового примера для оценки погрешностей рассмотрим параметры робота KUKA youBot [16]:

$$h = 0.235 \text{ м}, \quad l = 0.14 \text{ м}, \quad R = 0.05 \text{ м}, \quad s = 0.01 \text{ м}.$$

В качестве примера примем погрешности крепления осей двигателей колёс равными

$$\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 = 1°, \quad \Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_4 = 2°.$$

Ниже приведем результаты расчета погрешностей скоростей платформы при простых движениях платформы. В качестве примеров простых движений платформы рассмотрим:

– поступательное движение вперед: $V_L = 1$ м/с, $V_T = 0$ м/с, $\Omega = 0$ рад/с ;

– поступательное движение влево: $V_L = 0$ м/с, $V_T = 1$ м/с, $\Omega = 0$ рад/с ;

– вращение вокруг вертикальной оси, проходящей через геометрический центр платформы: $V_L = 0$ м/с, $V_T = 0$ м/с, $\Omega = 1$ рад/с .

Погрешности псевдоскоростей платформы при указанных движениях рассчитаем по формулам (12):

– движение вперед:

$\Delta V_L = 1.35\cdot10^{-4}$ м/с, $\Delta V_T = -8.73\cdot10^{-3}$ м/с, $\Delta\Omega = 6.8\cdot10^{-2}$ рад/с ;

– боковое движение влево:

$\Delta V_L = 8.72\cdot10^{-3}$ м/с, $\Delta V_T = -3.81\cdot10^{-4}$ м/с, $\Delta\Omega = 1.46\cdot10^{-4}$ рад/с ;

– вращение вокруг вертикальной оси, проходящей через геометрический центр платформы:

$\Delta V_L = -2.49\cdot10^{-3}$ м/с, $\Delta V_T = -4.22\cdot10^{-5}$ м/с, $\Delta\Omega = 1.97\cdot10^{-4}$ рад/с .

Полученные значения погрешностей псевдоскоростей являются значительными для мобильных роботов с меканум-колёсами, поскольку приводят к отклонениям по координатам порядка 10 см за 2 минуты движения робота. Это делает недопустимым функционирование меканум-платформы в автономном режиме в случае отсутствия компенсации указанных погрешностей позиционирования. Отметим, что наличие ненулевой погрешности угловой скорости вращения платформы приводит к нелинейному росту ошибки позиционирования платформы (формулы (15) при рассмотрении управления на кинематическом уровне.

Данные результаты позволяют сделать вывод о необходимости учета неточностей крепления осей колёс при построении системы управления. Отметим, что, поскольку погрешности крепления осей двигателей колёс являются неизвестными величинами, то для их определения требуется разрабатывать методики идентификации параметров математической модели движения робота [16].

Применение разработанной кинематической модели меканум-платформы, учитывающей неточности крепления осей двигателей колёс, даст возможность построить управление на кинематическом уровне с большей точностью позиционирования.

Таким образом, в рамках данной работы представлена модель кинематики мобильной платформы с меканум-колёсами при наличии погрешности установки осей двигателей колёс. Получена формула для оценки погрешностей псевдоскоростей платформы при программном управлении, формируемом на кинематическом уровне. Проведены оценки погрешностей отработки программного движения для простых движений меканум-платформы (движение вперед, боковое движение влево и вращение на месте).

Обсуждение и заключение. Полученная кинематическая модель мобильной платформы с меканум-колёсами может быть использована для повышения точности позиционирования за счет формирования управления движением платформы, компенсирующего влияние неточностей установки колёс. Для использования полученной модели в задачах управления меканум-платформой необходимо разработать в будущем методики идентификации параметров математической модели.

В качестве направления для дальнейших исследований в этой области можно назвать разработку математической модели динамики меканум-платформы с учетом погрешностей установки осей двигателей колёс.

Список литературы

1. Adascalitei F., Doroftei I. Practical Applications for a Mobile Robots Based on Mecanum Wheels – A Systematic Survey. *The Romanian Review Precession Mechanics, Optics & Mechatronics*. 2011;40:21–29.

2. Juhairi M.A.S. Holonomic and Omnidirectional Locomotion Systems for Wheeled Mobile Robots: A Review. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*. 2015;77(28):91–97. https://doi.org/10.11113/jt.v77.6799

3. Hendzel Z., Rykała Ł. Modeling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels with the Use of Lagrange Equations of the Second Kind. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering.* 2017;22(1):81–99. https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0005

4. Hendzel Z., Rykała Ł. Description of Kinematics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels. *Modeling in Engineering.* 2015;57:5–12.

5. Zeidis I., Zimmermann K. Dynamics of a Four-Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics.* 2019;99(12):e201900173. https://doi.org/10.1002/zamm.201900173

6. Adamov B.I. Influence of Mecanum Wheels Construction on Accuracy of the Omnidirectional Platform Navigation (on Example of KUKA youBot Robot). In: *Proc. 25th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation (ICINS).* New York City: IEEE; 2018. P. 1–4. https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405889

7. Palacin J., Martinez D., Rubies E., Clotet E. Suboptimal Omnidirectional Wheel Design and Implementation. *Sensors*. 2021;21(3):865. https://doi.org/10.3390/s21030865

8. Kyung-Lyong Han, Oh-Kyu Choi, Jinwook Kim, Hyosin Kim, Jin S. Lee. Design and Control of Mobile Robot with Mecanum Wheel. In: *Proc. Int. Conf. on Control, Automation and Systems* (*ICCAS-SICE)*. New York City: IEEE; 2009. P. 2932–2937.

9. Sun Wencheng, Li Shuge, Wang Weiqiang, Zhao Pengju, Yang Renqiang. Design of Chassis and Kinematics Research of Wheeled Robot. In: *Proc. IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference.* New York City: IEEE; 2020. P. 2405–2408. https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9085044

10. Junpeng Shao, Tianhua He, Jingang Jiang, Yongde Zhang. Recent Patents on Omni-Directional Wheel Applied on Wheeled Mobile Robot. *Recent Patents on Mechanical Engineering.* 2016;9(3):215–221. https://doi.org/10.2174/2212797609666160616091009

11. Dianfeng Zhang, Guangcang Wang, Zhaojing Wu. Reinforcement Learning-Based Tracking Control for a Three Mecanum Wheeled Robot. In: *Proc. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.* New York City: IEEE; 2022. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3185055

12. Danwei Wang, Chang Boon Low. Modeling and Analysis of Skidding and Slipping in Wheeled Mobile Robots: Control Design Perspective. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2008;24(3):676–687. https://doi.org/10.1109/TRO.2008.921563

13. Yunwang Li, Shirong Ge, Sumei Dai, Lala Zhao, Xucong Yan, Yuwei Zheng, et al. Kinematic Modeling of a Combined System of Multiple Mecanum-Wheeled Robots with Velocity Compensation. *Sensors*. 2019;20(1):75. https://doi.org/10.3390/s20010075

14. Li Xie, Christian Henkel, Karl Stol, Weiliang Xu. Power-Minimization and Energy-Reduction Autonomous Navigation of an Omnidirectional Mecanum Robot via the Dynamic Window Approach Local Trajectory Planning. *International Journal of Advanced Robotics Systems*. 2018;15(1):1–12. https://doi.org/10.1177/1729881418754563

15. Adamov B.I. A Study of the Controlled Motion of a Four-Wheeled Mecanum Platform. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics.* 2018;14(2):265–190. https://doi.org/10.20537/nd180209

16. Адамов Б.И., Кобрин А.И. Идентификация параметров математической модели мобильной роботизированной платформы всенаправленного движения KUKA youBot. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018;19(4):251–258. https://doi.org/10.17587/mau.19.251-258

References

1. Adascalitei F, Doroftei I. Practical Applications for Mobile Robots Based on Mecanum Wheels – a Systematic Survey. *The Romanian Review Precession Mechanics, Optics & Mechatronics*. 2011;40:21–29.

2. Safar MJA. Holonomic and Omnidirectional Locomotion Systems for Wheeled Mobile Robots: A Review. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering).* 2015;77(28):91–97. https://doi.org/10.11113/jt.v77.6799

3. Hendzel Z, Rykała Ł. Modeling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels with the Use of Lagrange Equations of the Second Kind. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering.* 2017;22(1):81–99. https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0005

4. Hendzel Z, Rykała Ł. Description of Kinematics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels. *Modeling in Engineering.* 2015;57:5–12.

5. Zeidis I, Zimmermann K. Dynamics of a Four-Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics.* 2019;99(12):e201900173. https://doi.org/10.1002/zamm.201900173

6. Adamov BI. Influence of Mecanum Wheels Construction on Accuracy of the Omnidirectional Platform Navigation (on Example of KUKA youBot Robot). In: *Proc. 25th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS).* New York City: IEEE; 2018. P. 1–4. https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405889

7. Palacin J, Martinez D, Rubies E, Clotet E. Suboptimal Omnidirectional Wheel Design and Implementation. *Sensors*. 2021;21(3):865. https://doi.org/10.3390/s21030865

8. Kyung-Lyong Han, Oh-Kyu Choi, Jinwook Kim, Hyosin Kim, Jin S Lee. Design and Control of Mobile Robot with Mecanum Wheel. In: *Proc. Int. Conf. on Control, Automation and Systems* (*ICCAS-SICE)*. New York City: IEEE; 2009. P. 2932–2937.

9. Sun Wencheng, Li Shuge, Wang Weiqiang, Zhao Pengju, Yang Renqiang. Design of Chassis and Kinematics Research of Wheeled Robot. In: *Proc. IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference.* New York City: IEEE; 2020. P. 2405–2408. https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9085044

10. Junpeng Shao, Tianhua He, Jingang Jiang, Yongde Zhang. Recent Patents on Omni-Directional Wheel Applied on Wheeled Mobile Robot. *Recent Patents on Mechanical Engineering.* 2016;9(3):215–221. https://doi.org/10.2174/2212797609666160616091009

11. Dianfeng Zhang, Guangcang Wang, Zhaojing Wu. Reinforcement Learning-Based Tracking Control for a Three Mecanum Wheeled Robot. In: *Proc. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.* New York City: IEEE; 2022. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3185055

12. Danwei Wang, Chang Boon Low. Modeling and Analysis of Skidding and Slipping in Wheeled Mobile Robots: Control Design Perspective. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2008;24(3):676–687. https://doi.org/10.1109/TRO.2008.921563

13. Yunwang Li, Shirong Ge, Sumei Dai, Lala Zhao, Xucong Yan, Yuwei Zheng, et al. Kinematic Modeling of a Combined System of Multiple Mecanum-Wheeled Robots with Velocity Compensation. *Sensors*. 2019;20(1):75. https://doi.org/10.3390/s20010075

14. Li Xie, Christian Henkel, Karl Stol, Weiliang Xu. Power-Minimization and Energy-Reduction Autonomous Navigation of an Omnidirectional Mecanum Robot via the Dynamic Window Approach Local Trajectory Planning. *International Journal of Advanced Robotics Systems*. 2018;15(1):1–12. https://doi.org/10.1177/1729881418754563

15. Adamov BI. A Study of the Controlled Motion of a Four-Wheeled Mecanum Platform. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics.* 2018;14(2):265–190. https://doi.org/10.20537/nd180209

16. Adamov BI, Kobrin AI. Parametric Identification of the Mathematical Model of the Omnidirectional Mobile Robot KUKA youBot. *Mechatronics, Automation, Control*. 2018;19(4):251–258. https://doi.org/10.17587/mau.19.251-258

Поступила в редакцию 17.09.2023
Поступила после рецензирования 15.10.2023
Принята к публикации 29.10.2023

Об авторах:

Галина Витальевна Панкратьева, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), SPIN-код: 3872-1911, ORCID, gvpankr@gmail.com

Антон Евгеньевич Мордин, студент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), SPIN-код: 1953-8416, ORCID, ToxaM_99@mail.ru

Гасан Русланович Сайпулаев, аспирант и ассистент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), SPIN-код: 4156-3048, ScopusID, ORCID, saypulaevgr@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.Е. Мордин — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, формирование выводов.

Г.В. Панкратьева — научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка текста.

Г.Р. Сайпулаев — проведение расчетов, подготовка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 17.09.2023
Revised 15.10.2023
Accepted 29.10.2023

About the Authors:

Galina V. Pankrateva, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, National Research University MPEI (14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, RF), SPIN-code: 3872-1911, ORCID, gvpankr@gmail.com

Anton E. Mordin, student of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, National Research University MPEI (14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, RF), SPIN-code: 1953-8416, ORCID, ToxaM_99@mail.ru

Gasan R. Saypulaev, postgraduate student, teaching assistant of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, National Research University MPEI (14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, RF), SPIN-code: 4156-3048, ScopusID, ORCID, saypulaevgr@mail.ru

Claimed contributorship:

AE Mordin: basic concept formulation, research objectives and tasks, computational analysis, formulation of conclusions.

GV Pankrateva: academic advising, analysis of the research results, revision of the text.

GR Saypulaev: computational analysis, text preparation, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МЕХАНИКА
MECHANICS




УДК 539.42
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-365-375

Научная статья



EDN: JBOFSU

Применение метода двойной аппроксимации для построения матриц жесткости объемных конечных элементов

П.П. Гайджуров, **Н.А. Савельева**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
gpp-161@yandex.ru

Аннотация
Введение. При численном решении задач теории упругости в трехмерной постановке методом конечных элементов применяются конечные элементы (КЭ) в форме параллелепипедов, призм и тетраэдров. Обычно построение матриц жесткости объемных КЭ базируется на принципе изопараметричности, суть которого состоит в использовании для аппроксимации геометрии и перемещений полиномов Лагранжа. В расчетной практике наибольшее распространение получили так называемые полилинейные изопараметрические КЭ с линейным законом аппроксимации перемещений. Главный недостаток данных элементов кроется в эффекте «*locking*» («запирания») при моделировании изгибных деформаций. Причем погрешность численного решения существенно возрастает в случае, когда конструкция, по сравнению с обычными деформациями, претерпевает значительные смещения как жесткое целое. Многолетний опыт решения задач механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов показал, что существующие объемные КЭ обладают медленной сходимостью при моделировании изгибных деформаций пластин и оболочек. Цель настоящего исследования состоит в построении на основе метода двойной аппроксимации матриц жесткости полилинейных объемных КЭ повышенной точности, позволяющих учитывать жесткие смещения.
Материалы и методы. Для построения матриц жесткости объемных КЭ применен математический аппарат метода двойной аппроксимации, суть которого состоит в раздельном представлении функций распределения перемещений и деформаций внутри элемента. Хранение и обработка результирующей системы уравнений реализованы в алгоритмических терминах разреженных матриц. Разработка программного обеспечения и проведение вычислительных экспериментов осуществлены с использованием 64-х разрядной вычислительной платформы Microsoft Visual Studio 2013 и компилятора Intel® Parallel Studio XE 2019 со встроенным текстовым редактором Intel® Visual Fortran Composer XE 2019. Визуализация результатов расчетов выполнена с помощью дескрипторной графики пакета компьютерной математики Matlab. В качестве тестового образца использован объемный восьмиузловой КЭ SOLID185 программного комплекса ANSYS Mechanical.
Результаты исследования. Разработано математическое и программное обеспечение для исследования напряженно-деформированного состояния массивных конструкций при различных видах внешнего воздействия. На тестовых примерах с известными аналитическими решениями выполнена верификация авторизированного пакета прикладных программ. Показано, что построенные КЭ по точности удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к конечно-элементному моделированию пространственных задач теории упругости.
Обсуждение и заключение. Проведенное тестирование разработанного математического и программного обеспечения показало, что построенные на основе метода двойной аппроксимации конечные элементы успешно конкурируют с аналогичными объемными элементами SOLID185 программного комплекса ANSYS Mechanical. Предлагаемые элементы могут быть интегрированы в отечественные импортозамещающие программные комплексы, реализующие метод конечных элементов в форме метода перемещений.

Ключевые слова: метод конечных элементов, моментная схема метода конечных элементов, метод двойной аппроксимации, объемные конечные элементы, тестирование конечных элементов

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Гайджуров П.П., Савельева Н.А. Применение метода двойной аппроксимации для построения матриц жесткости объемных конечных элементов. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):365–375. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-365-375

Original article

Application of the Double Approximation Method for Constructing Stiffness Matrices of Volumetric Finite Elements

Peter P. Gaidzhurov , Nina A. Saveleva

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ gpp-161@yandex.ru

Abstract

Introduction. When numerically solving problems of elasticity theory in a three-dimensional formulation by the finite element method, finite elements (FE) in the form of parallelepipeds, prisms and tetrahedra are used. Regularly, the construction of stiffness matrices of volumetric FE is based on the principle of isoparametricity, which involves the Lagrange polynomials to approximate the geometry and displacements. In computational practice, the most widespread FE are the so-called multilinear isoparametric FE with a linear law of approximation of displacements. The main disadvantage of these elements lies in the "locking" effect when modulating bending deformations. Moreover, the error of the numerical solution increases drastically in the case when the structure, in comparison to conventional deformations, undergoes significant displacements as a rigid whole. Long-term experience in solving problems of deformable solid mechanics by the finite element method has shown that existing volumetric FE have slow convergence, specifically, when modeling bending deformations of plates and shells. This study aims at constructing stiffness matrices of multilinear volumetric FE of increased accuracy allowing for rigid displacements based on the double approximation method.

Materials and Methods. The mathematical apparatus of the double approximation method based on the principle of a separate representation of the distribution functions of displacements and deformations inside the element, was used to construct the stiffness matrices of volumetric FE. The storage and processing of the resulting system of equations was implemented in algorithmic terms of sparse matrices. Software development and computational experiments were carried out using the Microsoft Visual Studio 2013 64-bit computing platform and the Intel ® Parallel Studio XE 2019 compiler with the integrated Intel ® Visual Fortran Composer XE 2019 text editor. Visualization of the calculation results was performed using the descriptor graphics of the MATLAB computer mathematics package. A large eight-node SOLID185 CE of the ANSYS Mechanical software complex was used as a test sample.

Results. Mathematical tool and software were developed to study the stress-strain state of massive structures under various types of external actions. The authorized application software package was verified on test examples with known analytical solutions. It has been shown that the constructed FE accurately satisfy the basic requirements for finite element modeling of spatial problems of elasticity theory.

Discussion and Conclusion. The performed testing of the developed mathematical and program toolkit has shown that the finite elements constructed on the basis of the double approximation method can successfully compete with similar SOLID185 volumetric elements of the ANSYS Mechanical software complex. The proposed elements can be integrated into domestic import-substituting software systems that implement the finite element method in the form of the displacement method.

Keywords: finite element method, moment scheme of finite element method, double approximation method, volumetric finite elements, finite element testing

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of this article.

For citation. Gaidzhurov PP, Saveleva NA. Application of the Double Approximation Method for Constructing Stiffness Matrices of Volumetric Finite Elements. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):365–375. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-365-375

Введение. При конечно-элементном моделировании напряженно-деформированного состояния массивных тел используются объемные конечные элементы (КЭ) в форме параллелепипедов (гексаэдров), призм и тетраэдров, построение матриц жесткости которых выполнено, как правило, по изопараметрической технологии [1–5]. Вместе с тем известно, что полилинейные изопараметрические КЭ при использовании однослойной схемы неудовлетворительно моделируют изгибные деформации даже при существенном сгущении сетки [6, 7]. Суть данной проблемы состоит в эффекте «*locking*» («запирания») элемента вследствие так называемой деформации «ложного сдвига» [8, 9]. Для «улучшения» изопараметрических КЭ используют аппарат несовместных элементов, созданных путем введения дополнительных неузловых степеней свободы или вспомогательных аппроксимирующих полиномов [8]. Вместе с тем наиболее эффективным способом решения проблемы «заклинивания» КЭ является применение моментной схемы метода конечных элементов, теоретические основы которой были разработаны А.С. Сахаровым [7]. В последующем данный подход получил название метод двойной аппроксимации (МДА) [6]. Концептуально МДА базируется на раздельном представлении функций распределения перемещений и деформаций внутри элемента. Целью настоящего исследования является построение на базе МДА и тестирование новых объемных полилинейных КЭ, позволяющих моделировать поведение различных конструкций при различных видах внешнего воздействия.

Материалы и методы. Рассмотрим семейство объемных КЭ, состоящее из восьмиузлового и шестиузлового элементов, в глобальных декартовых осях z_m, $m = 1, 2, 3$ (рис. 1). Геометрию и перемещения КЭ представим в следующем виде:

$$z_m = \sum_{k=1}^{n_e} z_m^{(k)} \, \varphi(x_1, x_2, x_3)\,; \; u_m = \sum_{k=1}^{n_e} u_m^{(k)} \, \varphi(x_1, x_2, x_3)\,,$$

где $z_m^{(k)}$, $u_m^{(k)}$ — узловые координаты и перемещения; $\varphi_k(x_1, x_2, x_3)$ — «функции формы», представляющие собой произведение одномерных полиномов Лагранжа первой степени; x_1, x_2, x_3 — локальные в общем случае неортогональные координаты КЭ; n_e — число узлов элемента. Для базового восьмиузлового элемента (рис. 1 *а*) $n_e = 8$ «функции формы» определяем по формуле:

$$\varphi_k\,(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{8}\prod_{r=1}^{3}(1 + p_{rk}\, x_r)\,, \tag{1}$$

здесь p_{rk} — координаты узлов в локальных осях. Значения p_{rk} задаем в форме матрицы:

$$\left[\begin{array}{c:c:c:c:c:c:c:c} 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ \hdashline -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ \hdashline -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}\right].$$

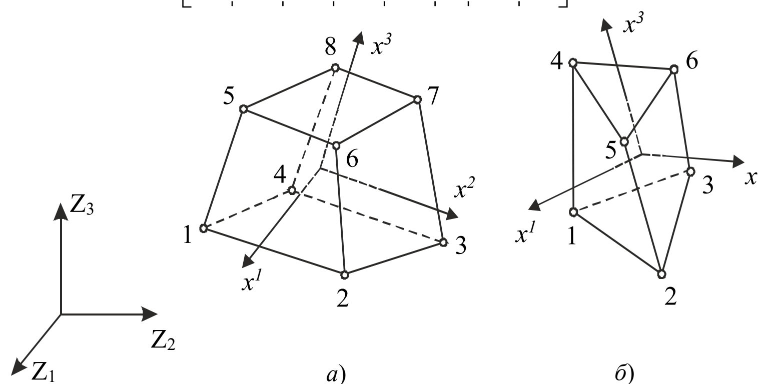


Рис. 1. Объемные КЭ: *а* — восьмиузловой; *б* — шестиузловой

Зависимость между ковариантными компонентами тензора деформаций в локальном базисе и перемещениями в глобальных осях имеет вид [7]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\Big(z_{m,j}\, u_{m,i} + z_{m,i}\, u_{m,j} \Big),$$

(суммирование по повторяющемуся индексу)

где $z_{m,s} = \partial z_m / \partial x_s$; $u_{m,s} = \partial u_m / \partial x_s$, $s = i, j$.

Связь между вектором деформаций $\{\varepsilon\}$ и вектором узловых перемещений $\{w\}$ представим в матричной форме:

$$\{\varepsilon\}=[D]\{w\},$$

где блочная матрица $\underset{(6\times n_e)}{[D]}=\Big[[D]_1\,[D]_2\ldots[D]_{n_e}\Big]$;

субматрица

$$\underset{(6\times 3)}{[D]_k}=\Big[\{D^{(1)}\}_k\,\{D^{(2)}\}_k\,\{D^{(3)}\}_k\Big],\ k=1,2,\ldots,n_e\,.$$

Выражения для вектор-столбцов рассматриваемых КЭ имеют следующий вид [10]: восьмиузловой элемент (рис. 1 *а*):

$$\{D^{(m)}\}_k=\frac{1}{8}\left\{\begin{array}{c} p_{1k}\Big[\tilde z_{m,1}+(\tilde z_{m,12}+\tilde z_{m,1}\,p_{2k})x_2+(\tilde z_{m,13}+\tilde z_{m,1}\,p_{3k})x_3+ \\ +(\tilde z_{m,123}+\tilde z_{m,12}\,p_{3k}+\tilde z_{m,13}\,p_{2k}+\tilde z_{m,1}\,p_{2k}\,p_{3k})\,x_2\,x_3\Big] \\ \hline p_{2k}\Big[\tilde z_{m,2}+(\tilde z_{m,12}+\tilde z_{m,2}\,p_{1k})x_1+(\tilde z_{m,23}+\tilde z_{m,2}\,p_{3k})x_3+ \\ +(\tilde z_{m,123}+\tilde z_{m,12}\,p_{3k}+\tilde z_{m,23}\,p_{1k}+\tilde z_{m,2}\,p_{1k}\,p_{3k})\,x_1\,x_3\Big] \\ \hline p_{3k}\Big[\tilde z_{m,3}+(\tilde z_{m,13}+\tilde z_{m,3}\,p_{1k})x_1+(\tilde z_{m,23}+\tilde z_{m,3}\,p_{2k})x_2+ \\ +(\tilde z_{m,123}+\tilde z_{m,13}\,p_{2k}+\tilde z_{m,23}\,p_{1k}+\tilde z_{m,3}\,p_{1k}\,p_{2k})\,x_1\,x_2\Big] \\ \hline \tilde z_{m,1}\,p_{2k}+\tilde z_{m,2}\,p_{1k}+(\tilde z_{m,13}\,p_{2k}+\tilde z_{m,1}\,p_{2k}\,p_{3k}+\tilde z_{m,23}\,p_{1k}+ \\ +\tilde z_{m,2}\,p_{1k}\,p_{3k})\,x_3 \\ \hline \tilde z_{m,1}\,p_{3k}+\tilde z_{m,3}\,p_{1k}+(\tilde z_{m,12}\,p_{3k}+\tilde z_{m,1}\,p_{2k}\,p_{3k}+\tilde z_{m,23}\,p_{1k}+ \\ +\tilde z_{m,3}\,p_{1k}\,p_{2k})\,x_2 \\ \hline \tilde z_{m,2}\,p_{3k}+\tilde z_{m,3}\,p_{2k}+(\tilde z_{m,12}\,p_{3k}+\tilde z_{m,2}\,p_{1k}\,p_{3k}+\tilde z_{m,13}\,p_{2k}+ \\ +\tilde z_{m,3}\,p_{1k}\,p_{2k})\,x_1 \end{array}\right\};\qquad(2)$$

шестиузловой элемент (рис. 1 *б*):

$$\{D^{(m)}\}_k=\frac{1}{8}\left\{\begin{array}{c} \tilde z_{m,1}\,\tilde\varphi_{k,1}+(\tilde z_{m,13}\,\tilde\varphi_{k,1}+\tilde z_{m,1}\,\tilde\varphi_{k,13})\,x_3 \\ \hline \tilde z_{m,2}\,\tilde\varphi_{k,2}+(\tilde z_{m,23}\,\tilde\varphi_{k,2}+\tilde z_{m,2}\,\tilde\varphi_{k,23})\,x_3 \\ \hline \tilde z_{m,3}\,\tilde\varphi_{k,3}+(\tilde z_{m,13}\,\tilde\varphi_{k,3}+\tilde z_{m,3}\,\tilde\varphi_{k,13})\,x_1+ \\ +(\tilde z_{m,23}\,\tilde\varphi_{k,3}+\tilde z_{m,3}\,\tilde\varphi_{k,23})\,x_2 \\ \hline \tilde z_{m,1}\,\tilde\varphi_{k,2}+\tilde z_{m,2}\,\tilde\varphi_{k,1}+(\tilde z_{m,13}\,\tilde\varphi_{k,2}+\tilde z_{m,1}\,\tilde\varphi_{k,23}+ \\ +\tilde z_{m,23}\,\tilde\varphi_{k,1}+\tilde z_{m,2}\,\tilde\varphi_{k,13})\,x_3 \\ \hline \tilde z_{m,1}\,\tilde\varphi_{k,3}+\tilde z_{m,3}\,\tilde\varphi_{k,1} \\ \hline \tilde z_{m,2}\,\tilde\varphi_{k,3}+\tilde z_{m,3}\,\tilde\varphi_{k,2} \end{array}\right\}.\qquad(3)$$

Здесь введены обозначения:

$$\tilde z_{m,\alpha}=\left.\frac{\partial z_m}{\partial x_\alpha}\right|_{x_1=x_2=x_3=0},\ \tilde z_{m,\alpha\beta}=\left.\frac{\partial^2 z_m}{\partial x_\alpha\,\partial x_\beta}\right|_{x_1=x_2=x_3=0};$$

$$\tilde z_{m,123}=\left.\frac{\partial^3 z_m}{\partial x_1\,\partial x_2\,\partial x_3}\right|_{x_1=x_2=x_3=0}.$$

$$\tilde\varphi_{k,\alpha}=\left.\frac{\partial\tilde\varphi_k}{\partial x_\alpha}\right|_{x_1=x_2=x_3=0};\ \tilde\varphi_{k,\alpha\beta}=\left.\frac{\partial^2\tilde\varphi_k}{\partial x_\alpha\,\partial x_\beta}\right|_{x_1=x_2=x_3=0};\ \alpha,\beta=1,2,3\,.$$

Выражения для «функций формы» $\tilde\varphi_k(x_1,x_2,x_3)$ шестиузлового КЭ, полученные на основании полинома (1) с помощью принципа «вырождения», имеют следующий вид:

$$\tilde\varphi_1=\frac{1}{8}(1+p_{11}x_1)(1+p_{21}x_2)(1+p_{31}x_3)\,;$$

$$\tilde\varphi_2=\frac{1}{8}(1+p_{12}x_1)(1+p_{22}x_2)(1+p_{32}x_3)\,;$$

$$\tilde{\varphi}_3 = \frac{1}{8}\Big[(1+p_{13}x_1)(1+p_{23}x_2)(1+p_{33}x_3)+(1+p_{14}x_1)(1+p_{24}x_2)(1+p_{34}x_3)\Big];$$

$$\tilde{\varphi}_4 = \frac{1}{8}(1+p_{15}x_1)(1+p_{25}x_2)(1+p_{35}x_3);$$

$$\tilde{\varphi}_5 = \frac{1}{8}(1+p_{16}x_1)(1+p_{26}x_2)(1+p_{36}x_3);$$

$$\tilde{\varphi}_6 = \frac{1}{8}\Big[(1+p_{17}x_1)(1+p_{27}x_2)(1+p_{37}x_3)+(1+p_{18}x_1)(1+p_{28}x_2)(1+p_{38}x_3)\Big].$$

Формулы (2) и (3) являются основой для построения матриц жесткости рассматриваемых КЭ. Соответствующее программное обеспечение разработано на базе вычислительной платформы Microsoft Visual Studio и компилятора Intel® Parallel Studio XE с встроенным текстовым редактором Intel® Visual Fortran Composer XE. Процессы хранения и обработки глобальной матрицы жесткости реализованы в терминах разреженных матриц [11]. Для визуализации результатов расчетов использована дескрипторная графика компьютерной системы Matlab.

Результаты исследования. Исследование точности и сходимости разработанного конечно-элементного алгоритма выполнили на тестовых примерах, имеющих аналитическое решение. В тестовых примерах приведены численные решения, полученные с использованием разработанных элементов и аналогичного по размерности элемента SOLID185 программного комплекса ANSYS Mechanical [5, 11]. Ниже приведены примеры, подобранные таким образом, чтобы в них присутствовало сочетание изгибных деформаций и жестких смещений КЭ.

Пример 1. Разрезное кольцо, жестко закрепленное в одном сечении и загруженное сосредоточенной силой на свободном конце. Расчетная схема кольца показана на рис. 2. Исходные данные: средний радиус $R = 0{,}2$ м; размеры поперечного сечения 0,2×0,2 см; модуль упругости $E = 10^{11}$ Н/м^2; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$; сосредоточенная сила $F = 10$ Н.

Прогиб в точке приложения силы по теории кривых стержней (точное решение) составляет [7]:

$$f = \frac{F\pi R^3}{EJ} = \frac{10\cdot 3{,}14\cdot 0{,}2^3}{1\cdot 10^{11}\cdot 8{,}333\cdot 10^{-10}} = -0{,}00302 \text{ м.}$$

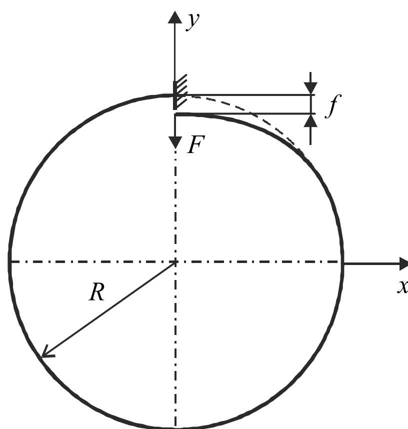


Рис. 2. Расчетная схема разрезного кольца

Результаты сходимости представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты сходимости для разрезного кольца

Сетка	f/δ, м / %	
	МДА	ANSYS
2×2×32	–0,00170 / 44	–0,000433 / 86
2×2×64	–0,00292 / 3,3	–0,00125 / 59
2×2×128	–0,00293 / 3	–0,00251 / 17

В таблице 1 в числителе приведено значение прогиба *f*, в знаменателе — относительная погрешность δ.

Визуализация перемещений u_y, полученная на базе МДА и ANSYS на сетке 2×2×64, представлена на рис. 3 и 4. Отметим, что поле вертикальных перемещений, полученное с помощью ANSYS, не отражает зоны с экстремальным значением $u_y = -0{,}00314$ м, показанной на рис. 3 стрелкой.

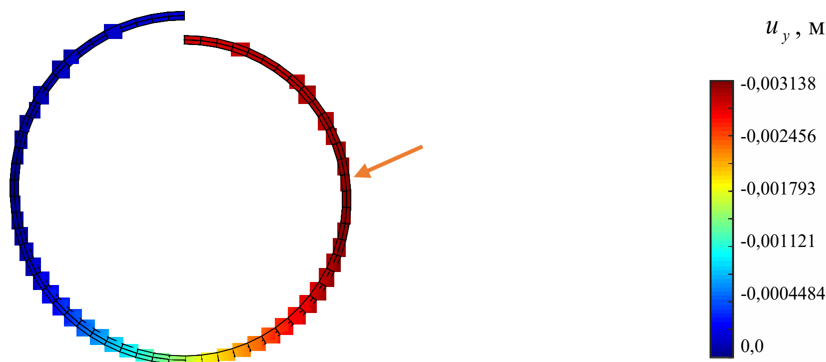


Рис. 3. Картина распределения u_y (МДА)

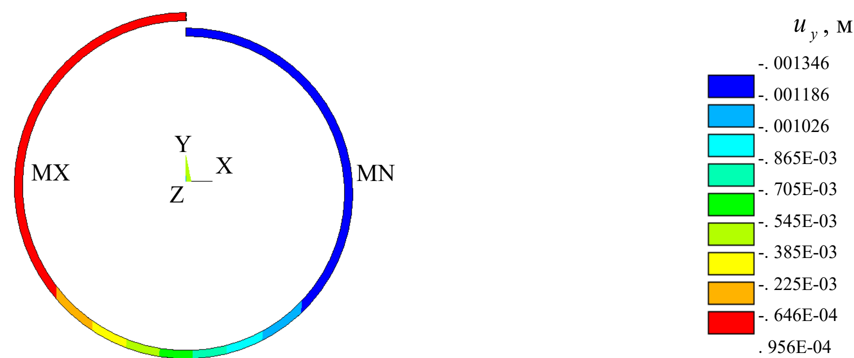


Рис. 4. Картина распределения u_y (ANSYS)

В данном примере особенно отчетливо прослеживается важность учета жестких смещений.

Пример 2. Квадратная пластина, жестко защемленная по контуру и нагруженная равномерно распределенной нагрузкой. Исходные данные: длина стороны $a = 1$ м; толщина $h = 0{,}01$ м; модуль упругости $E = 10^5$ Н/м²; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}25$.

Точное значение прогиба в центре пластины определяется по формуле [12]:

$$u_q = \alpha \frac{q a^4}{D},$$

где $\alpha = 0{,}00126$; $D = \dfrac{E h^3}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость; $q = 0{,}00888889$ Н/м² — интенсивность распределенной нагрузки. Точная величина u_q (в метрах) равна коэффициенту α.

В данном примере рассматривалась ¼ часть пластины с учетом условий симметрии. Результаты сходимости в виде графиков $u_q \sim s$ для однослойной и двухслойной моделей представлены на рис. 5 и 6. Здесь и далее под слоями подразумевается разбивка пластины на КЭ по толщине. На этих рисунках значения параметра s 1, 2, 3, 4 соответствуют сеткам: 4×4, 8×8, 16×16, 32×32. Приведенные графики отображают результаты решения, полученные с помощью ANSYS (линия 1) и МДА (линия 2). Горизонтальная линия, обозначенная цифрой 3, соответствует точному решению.

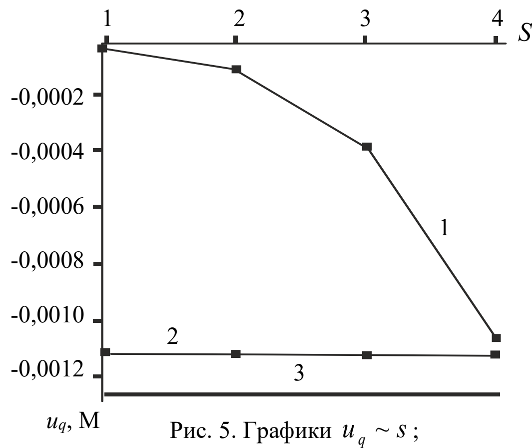


Рис. 5. Графики $u_q \sim s$;
однослойная схема

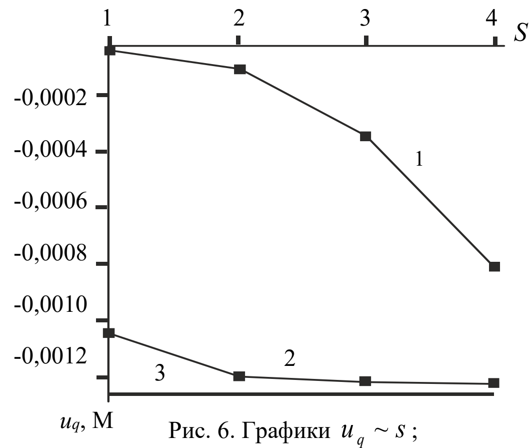


Рис. 6. Графики $u_q \sim s$;
двухслойная схема

Из рис. 5 следует, что при однослойной схеме разбивки значения относительной погрешности на сетке 32×32 составляют: SOLID185 — 16 %; МДА — 10,5 %. При использовании двухслойной схемы (рис. 6) на сетке 32×32 имеем: SOLID185 — 36 %; МДА — 2,8 %.

Патч-тестирование КЭ выполнено для схемы разбивки 16×16×2 с искажением сетки (рис. 7). Результаты патч-теста в виде картин распределения прогибов u_z приведены на рис. 8 и 9.

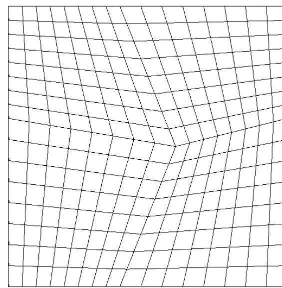


Рис. 7. Схема разбивки пластины для патч-теста

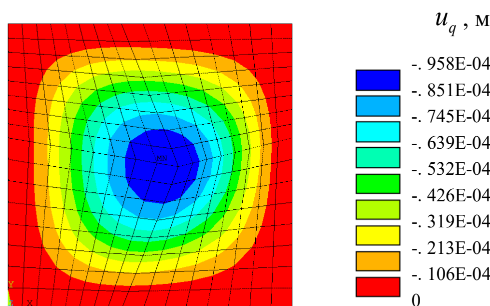


Рис. 8. Распределение u_q (SOLID185)

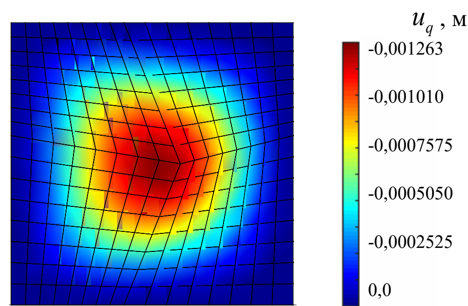


Рис. 9. Распределение u_q (МДА)

Как видно из рисунков, искажение сетки при использовании SOLID185 приводит к более заметной асимметрии поля u_z, чем при использовании МДА. При этом значение максимального прогиба для КЭ МДА $u_q = 0{,}001263$ м совпадает с точным решением.

Пример 3. Круглая пластина, жестко защемленная по контуру и нагруженная равномерно распределенной нагрузкой. Радиус и толщина пластины: $R = 1$ м; $h = 0{,}01$ м. Механические константы аналогичны данным примера 2.

Точное значение прогиба в центре пластины определяется по формуле [12]:

$$u_q = \frac{1}{64}\frac{q\,a^4}{D}.$$

При значении интенсивности распределенной нагрузки $q = 0{,}00888889$ Н/м² значение $u_q = 0{,}01563$ м.

В процессе тестирования были использованы два варианта дискретизации ¼ части пластины (сектора) на КЭ. В первом варианте три стороны сектора делились на равное число отрезков. Второй вариант базировался на радиальной регулярной схеме разбивки сектора. При этом число элементов вдоль радиуса и циркульной части сектора принималось одинаковым. Рассмотренные варианты дискретизации сектора для сетки 32×32 приведены на рис. 10.



Рис. 10. Варианты дискретизации сектора круглой пластины на КЭ: 1 — равномерная разбивка трех сторон сектора; 2 — радиальная регулярная разбивка

Результаты сходимости в виде графиков $u_q \sim s$ для дискретизации ¼ части пластины по варианту 1 при однослойной и двухслойной схемах разбивки представлены соответственно на рис. 11, 12 и рис. 13, 14.

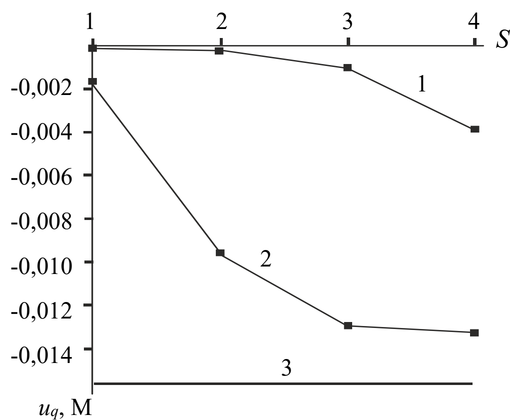


Рис. 11. Графики $u_q \sim s$ для варианта 1; однослойная схема

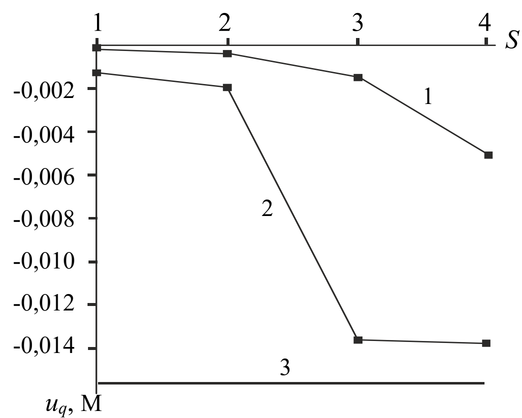


Рис. 12. Графики $u_q \sim s$ для варианта 2; однослойная схема

На этих рисунках значения параметра s 1, 2, 3, 4 соответствуют сеткам 4×4, 8×8, 16×16, 32×32. Как и в примере 1, линия 1 соответствует решению на базе SOLID185, а линия 2 — МДА. Горизонтальная линия, обозначенная цифрой 3, соответствует точному решению.

Из приведенных графиков следует, что элемент, построенный по моментной схеме на сетке 32×32×2 вариант 2, имеет относительную погрешность 4 %.

Картины визуализации поля распределения вертикальных перемещений u_z для МДА и SOLID185 при радиальной схеме разбивки ¼ пластины (сетка 32×32×2) показаны соответственно на рис. 15 и 16.

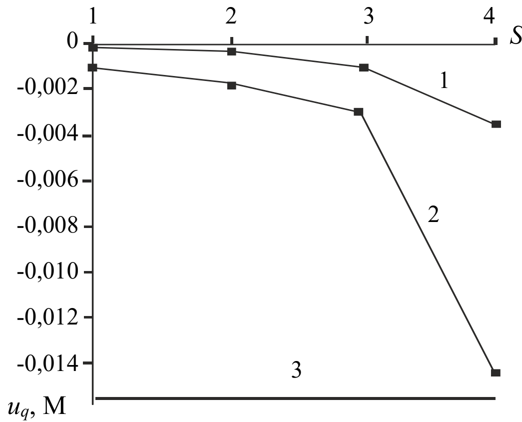


Рис. 13. Графики $u_q \sim s$ для варианта 1; двухслойная схема

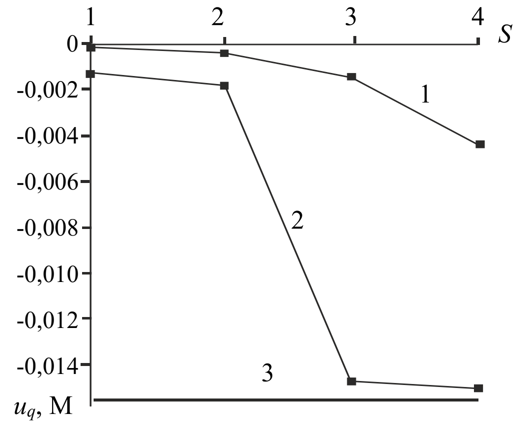


Рис. 14. Графики $u_q \sim s$ для варианта 2; двухслойная схема

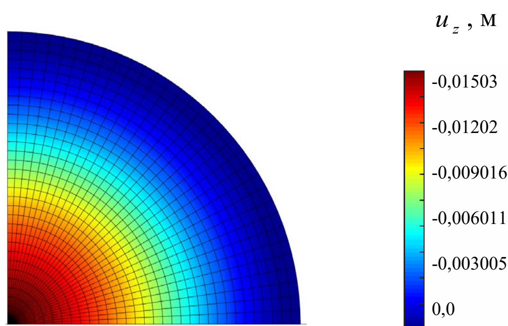


Рис. 15. Распределение u_z (МДА)

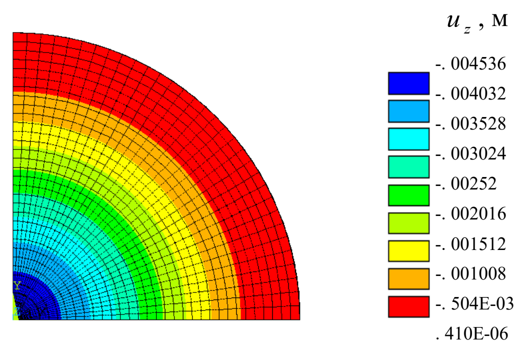


Рис. 16. Распределение u_z (SOLID185)

Из приведенных рисунков видно, что несмотря на качественное совпадение картин u_z, относительные погрешности для максимального прогиба составляют: МДА — 3,8 %; SOLID185 — 71 %. Такая значительная погрешность при использовании SOLID185 объясняется тем, что разработчики использовали для аппроксимации геометрии и перемещений шестиузлового КЭ «функции формы» аналогичные функциям, примененным для восьмиузлового элемента, т. е. без принципа «вырождения» [7].

Обсуждение и заключение. Построенные на базе метода двойной аппроксимации матрицы жесткостей объемных полилинейный конечных элементов позволяют моделировать напряженно-деформированное состояние строительных конструкций произвольной геометрии при различных видах внешнего воздействия. Принципиальным отличием предлагаемой концепции от ранее известных конечно-элементных технологий является то, что перемещения в данном случае задаются в глобальных координатах, а компоненты тензора деформаций определяются в местных, в общем случае, неортогональных осях.

На тестовых примерах показано, что объемные конечные элементы, построенные по методу двойной аппроксимации, обладают устойчивой сходимостью и успешно конкурируют с элементом аналогичного типа SOLID185 вычислительного комплекса ANSYS Mechanical.

Разработанное математическое обеспечение может быть внедрено в отечественные импортозамещающие программные комплексы, реализующие метод конечных элементов в форме метода перемещений.

Список литературы

1. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method,* Fifth edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann; 2000. 708 p.

2. David V. Hutton. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. New York, NY: McGraw Hill Companies; 2004. 494 p. URL: https://wp.kntu.ac.ir/fz_kalantary/Source/Finite%20element%20method/BooksNumerical/Fundamentals%20of%20Finite%20Element%20Analysis,%20Hutton%20(2004).pdf (дата обращения: 15.08.2023).

3. Daryl L. Logan. *A First Course in the Finite Element Method*. New York, NY: CL Engineering; 2011. 836 p. URL: https://kntu.ac.ir/DorsaPax/userfiles/file/Mechanical/OstadFile/dr_nakhodchi/DarylL.LoganAFirstCourse.pdf (дата обращения: 15.08.2023).

4. Carlos A. Felippa. *Introduction to Finite Element Methods*. Boulder, CO: University of Colorado; 2004. 791 p. URL: https://vulcanhammernet.files.wordpress.com/2017/01/ifem.pdf (дата обращения: 15.08.2023).

5. Saeed Moaveni. *Finite Element Analysis. Theory and Application with ANSYS*. Hoboken, NJ: Prentice Hall; 1999. 527 p. URL: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM738/Livros/Finite%20Element%20Analysis,%20Theory%20and%20application%20with%20ANSYS,%20.pdf (дата обращения: 15.08.2023).

6. Голованов А.И., Тюленева О.Н., Шигабутдинов А.Ф. *Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций.* Москва: Физматлит; 2006. 391 с.

7. David V. Hutton. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. New York, NY: McGraw-Hill; 2004. 505 p. URL: https://wp.kntu.ac.ir/fz_kalantary/Source/Finite%20element%20method/BooksNumerical/Fundamentals%20of%20Finite%20Element%20Analysis,%20Hutton%20(2004).pdf (дата обращения: 15.08.2023).

8. Miguel Luiz Bucalem, Klaus-Jürgen Bathe. *The Mechanics of Solids and Structures – Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution*. New York, NY: Springer; 2011. 597 p.

9. Jacob Fish, Ted Belytschko. *A First Course in Finite Elements*. Hoboken, NJ: Wiley; 2007. 319 p.

10. Гайджуров П.П. *Конечные элементы повышенной точности для решения трехмерных задач теории упругости*. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2003;(1):54–57. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/konechnye-elementy-povyshennoy-tochnosti-dlya-resheniya-trehmernyh-zadach-teorii-uprugosti/viewer (дата обращения: 15.08.2023).

11. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. *ANSYS для инженеров. Справочное пособие*. Москва: Машиностроение; 2004. 512 с. URL: https://www.researchgate.net/profile/AKravchuk/publication/262729610_ANSYS_-dla_inzenerov/links/0f31753b4294b13fc9000000/ANSYS-dlainzenerov.pdf (дата обращения: 15.08.2023).

12. Madenci E., Guven I. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. New York, NY: Springer; 2015. 664 p.

References

1. Zienkiewicz OC, Taylor RL. *The Finite Element Method,* Fifth edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann; 2000. 708 p.

2. David V Hutton. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. New York, NY: The McGraw Hill Companies; 2004. 494 p. URL: https://wp.kntu.ac.ir/fz_kalantary/Source/Finite%20element%20method/BooksNumerical/Fundamentals%20of%20Finite%20Element%20Analysis,%20Hutton%20(2004).pdf (accessed: 15.08.2023).

3. Daryl L Logan. *A First Course in the Finite Element Method*. New York, NY: CL Engineering; 2011. 836 p. URL: https://kntu.ac.ir/DorsaPax/userfiles/file/Mechanical/OstadFile/dr_nakhodchi/DarylL.LoganAFirstCourse.pdf (accessed: 15.08.2023).

4. Carlos A Felippa. *Introduction to Finite Element Methods*. Boulder, CO: University of Colorado; 2004. 791 p. URL: https://vulcanhammernet.files.wordpress.com/2017/01/ifem.pdf (accessed: 15.08.2023).

5. Saeed Moaveni. *Finite Element Analysis. Theory and Application with ANSYS*. Hoboken, NJ: Prentice Hall; 1999. 527 p. URL: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM738/Livros/Finite%20Element%20Analysis,%20Theory%20and%20application%20with%20ANSYS,%20.pdf (accessed: 15.08.2023).

6. Golovanov AI, Tyuleneva ON, Shigabutdinov AF. *Finite Element Method in Statics and Dynamics of Thin-Walled Structures.* Moscow: Fizmatlit; 2006. 391 p. (In Russ.)

7. David V Hutton. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. New York, NY: McGraw-Hill; 2004. 505 p. URL: https://wp.kntu.ac.ir/fz_kalantary/Source/Finite%20element%20method/BooksNumerical/Fundamentals%20of%20Finite%20Element%20Analysis,%20Hutton%20(2004).pdf (accessed: 15.08.2023).

8. Miguel Luiz Bucalem, Klaus-Jürgen Bathe. *The Mechanics of Solids and Structures – Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution*. New York, NY: Springer; 2011. 597 p.

9. Jacob Fish, Ted Belytschko. *A First Course in Finite Elements*. Hoboken, NJ: Wiley; 2007. 319 p.

10. Gaidzhurov PP. Finite Elements of Increased Accuracy for Solving 3D Problems of Elasticity Theory. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series.* 2003;(1):54–57. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/konechnye-elementy-povyshennoy-tochnosti-dlya-resheniya-trehmernyh-zadach-teorii-uprugosti/viewer (accessed: 15.08.2023). (In Russ.)

11. Chigarev AV, Kravchuk AS, Smalyuk AF. *ANSYS for Engineers. Moscow*: Mashinostroenie; 2004. 512 p. URL: https://www.researchgate.net/profile/AKravchuk/publication/262729610_ANSYS_dla_inzenerov/links/0f31753b4294b13fc9000000/ANSYS-dla-inzenerov.pdf (accessed: 15.08.2023). (In Russ.)

12. Madenci E, Guven I. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. New York, NY: Springer; 2015. 664 p.

Поступила в редакцию 29.09.2023
Поступила после рецензирования 31.10.2023
Принята к публикации 18.11.2023

Об авторах:

Петр Павлович Гайджуров, доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, SPIN-код: 6812-9718, gpp-161@yandex.ru

Нина Александровна Савельева, старший преподаватель кафедры строительной механики и теории сооружений Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8437-8080, ORCID, ninasav86@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

П.П. Гайджуров — постановка задачи, выбор метода решения и построение математической и компьютерной модели, обсуждение результатов.

Н.А. Савельева — проведение обзора, проведение расчетов, обсуждение результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 29.09.2023
Revised 31.10.2023
Accepted 18.11.2023

About the Authors:

Peter P. Gaidzhurov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 6812-9718, ORCID, gpp-161@yandex.ru

Nina A. Saveleva, Senior lecturer of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 8437-8080, ORCID, ninasav86@mail.ru

Claimed contributorship:

PP Gaidzhurov: problem statement, selection of solution method and building of mathematical and computer model, discussion of the results.

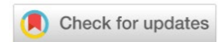
NA Saveleva: conducting a review, computational analysis, discussion of the results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 621.791.14 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-376-386



EDN: LFCYNM

Преимущества сварки трением штуцеров с конической контактирующей формой малого диаметра

Ю.В. Полетаев, **В.В. Щепкин** ✉
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ shepkinviktor@rambler.ru

Аннотация
Введение. По свидетельствам многочисленных производственных испытаний, применение ручной дуговой сварки (РДС) толстостенных штуцеров малого диаметра (до 80 мм) не обеспечивает получения качественного сварного соединения, удовлетворяющего требованиям нормативно-технических документов атомных электрических станций (АЭС). Решение указанной проблемы возможно на основе разработки технологии сварки с оптимальным тепловложением и применения ее взамен РДС. Существующие технологии сварки плавлением не позволяют обеспечить оптимальное регулируемое тепловложение. Однако это может быть реализовано при разработке и дальнейшем использовании способа сварки трением (СТ). Поэтому цель данной работы заключалась в разработке технологии на основе автоматизированного способа сварки трением, позволяющей повысить качество сварных соединений штуцеров малого диаметра энергетического оборудования до уровня нормативных требований.
Материалы и методы. Использовали штуцеры малого диаметра с конусной контактирующей поверхностью из низколегированной стали 10ГН2МФА. Экспериментальное исследование выполняли на машине сварки трением МСТ–41. Использованы методы неразрушающего и разрушающего контроля качества в соответствии с нормативно-технической документацией атомного энергетического машиностроения.
Результаты исследования. Разработана методика и определены оптимальные размеры конусной контактирующей поверхности при сварке. Показано, что оптимальное тепловложение при сварке трением достигается при подготовке конусной контактирующей поверхности в диапазоне углов $\alpha = 30^o$–40^o. Экспериментально отработана методика и параметры режима сварки трением моделей штуцеров малого диаметра. В ходе исследований получена и описана циклограмма процесса сварки трением, подтвердившая стадийное формирование сварного соединения за счет последовательного включения в стадию нагрева кольцевых участков конической поверхности соединяемых деталей. Получены результаты неразрушающего и разрушающего контроля, подтвердившие наличие качественного сварного соединения на уровне требований нормативно-технических документов АЭС.
Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследований могут быть использованы для разработки технологии сварки трением патрубков, а также изделий из углеродистых и низколегированных сталей.

Ключевые слова: имитатор штуцера, ручная дуговая сварка, сварка трением, коническая поверхность, циклограмма, параметры режима, оптимальное тепловложение, механические свойства

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Полетаев Ю.В., Щепкин В.В. Преимущества сварки трением штуцеров с конической контактирующей формой малого диаметра. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):376–386. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-376-386

Original article

Advantages of Friction Welding of Fittings with Small Diameter Conical Contact Form

Yuri V. Poletaev, Viktor V. Shchepkin ✉
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ shepkinviktor@rambler.ru

Abstract
Introduction. As numerous production tests show, the use of manual arc welding (MAW) of thick-walled fittings of small diameter (up to 80 mm) does not provide a high-quality weld joint that meets the requirements of regulatory and technical documents of nuclear power plants (NPP). The solution to this problem is possible on the basis of research and development of welding technology with optimal heat input instead of MAW. Existing fusion welding technologies do not allow for optimal regulated heat input. However, this can be realized during the development and further use of the friction welding (FW) method. Therefore, this work aimed at developing a technology based on an automated technique of friction welding, which could provide the enhancing of the quality of weld joints of small diameter fittings of power equipment to the level of regulatory requirements.
Materials and Methods. Small diameter fittings with a conical contact surface made of low-alloy steel 10GN2MFA were used. The experimental study was performed on a friction welding machine MST–41. Methods of non-destructive and destructive quality control were used in accordance with the regulatory and technical documentation of nuclear power engineering.
Results. A methodology was developed, and the optimal dimensions of the conical contacting surface under welding were determined. It was shown that optimal heat input during friction welding was achieved by preparing a conical contacting surface in the angle range α = 30º–40º. The methodology and parameters of the friction welding mode for models of small diameter fittings were experimentally tested. In the course of the research, a cyclogram of the friction welding process was obtained and described, which confirmed the stage-by-stage formation of the weld joint due to the sequential inclusion of annular sections of the conical surface of the connected parts in the heating stage. The results of non-destructive and destructive testing were obtained, confirming the presence of a high-quality weld joint at the level of the requirements of the regulatory and technical documents of the NPP.
Discussion and Conclusion. The obtained research results can be used to develop the technology of friction welding of pipes, as well as products made of carbon and low-alloy steels.

Keywords: fitting simulator, manual arc welding, friction welding, conical surface, cyclogram, mode parameters, optimal heat input, mechanical properties

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Poletaev YuV, Shchepkin VV. Advantages of Friction Welding of Fittings with Small Diameter Conical Contact Form. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):376–386. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-376-386

Введение. Основной проблемой сварки штуцеров малого диаметра является малая протяженность сварных швов, что не позволяет полностью контролировать качество процесса ручной дуговой сварки. Подвод сварочной аппаратуры к месту сварки также не всегда технологически возможен.

Вварные и приварные штуцеры соединяются с основной деталью угловым швом способом ручной дуговой сварки покрытым электродом. Вварные штуцера приваривают снаружи или изнутри с конструктивным непроваром. В любом случае наличие незавариваемых зазоров в соединениях, являющихся концентраторами напряжений, снижает работоспособность конструкции, так как может быть причиной возникновения трещин. Более совершенным является соединение, не имеющее незаваренный зазор. Иногда с целью получения гарантированного провара всей стенки штуцера и исключения возможности образования трещины от непровара используют удаляемую после сварки формирующую кольцевую подкладку или вваривают толстостенную заготовку патрубка. После сварки ее рассверливают до заданного чертежом внутреннего диаметра (рис. 1). Это довольно трудоемко, но оправданно в ответственных конструкциях, например, при изготовлении оборудования атомных электростанций [1]. Данный способ изображен на рис. 1, где изображен штуцерный узел до (*а*) и после сварки (*б*). Здесь: D — внутренний диаметр штуцера; h, b — катеты сварного соединения; S — толщина стенки

штуцера. Согласно нормативному документу[1], из которого заимствован рисунок, допускаемый размер на толщину стенки штуцера должен быть ≥2 мм; притупление сварного соединения — 4±1 мм; угол разделки кромок под сварку — 50°±5°.

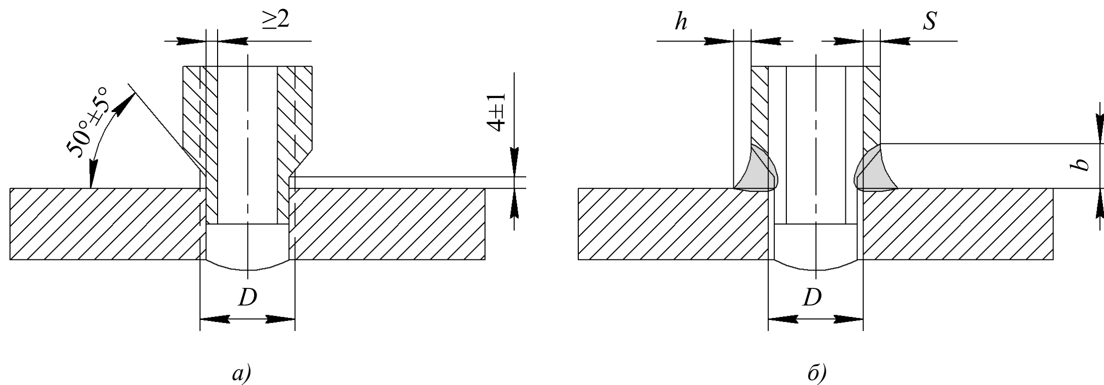


Рис. 1. Штуцерный узел: *а* — до сварки; *б* — после сварки и удаления корня шва

Для приварки штуцера выполняются следующие технологические операции: точение отверстия в корпусе, разделка кромок на штуцере, сборка узла с соблюдением перпендикулярности, прихватка штуцера, многопроходная сварка, удаление корневой части сварного шва путем расточки внутреннего диаметра до нормативных размеров.

Известные недостатки РДС не позволяют обеспечить стабильное качество сварного соединения и характеризуются большим объемом литого металла шва в ограниченном пространстве. Это приводит к перегревам и высоким остаточным напряжениям, что требует проведения дополнительных операций в виде термообработки. Стоимость ремонта оборудования в случае поломки высока. Это приводит к временным и экономическим затратам [2–6].

Анализ результатов литературного обзора и производственного опыта свидетельствуют о технической и экономической целесообразности отказа от использования способа РДС для получения сварных толстостенных соединений штуцеров и патрубков малого диаметра (до 80 мм) [7, 8].

В этой связи было решено исследовать влияние формы разделки кромок и способа сварки трением взамен РДС с целью обеспечения оптимально-минимального тепловложения и стабильного качества сварных соединений. Сварка трением как раз характеризуется оптимальным тепловоложением (по сравнению со способами сварки плавлением), при котором формируется мелкозернистая структура с низким уровнем остаточных сварочных напряжений и высоким уровнем механических свойств [9, 10].

Цель работы заключается в повышении до уровня нормативных требований качества сварных соединений штуцеров малого диаметра энергетического оборудования на основе разработки автоматизированного способа сварки трением.

Материалы и методы. Теоретические и экспериментальные исследования выполнены на сварных соединениях из низколегированной стали 10ГН2МФА, используемой в качестве основного конструкционного материала для изготовления парогенератора, компенсатора давления и другого ответственного оборудования АЭС[2].

В работе использовали расчетно-экспериментальный метод выбора оптимальной формы соединяемых поверхностей при сварке.

Разработанную технологию сварки трением реализовали при выполнении сварных соединений штуцеров на установке МСТ-41.

Для оценки качества сварных соединений использовали методы и объемы неразрушающего (радиографический, ультразвуковой, визуально-измерительный, определение твердости) и разрушающего (испытания статической прочности и ударного изгиба, металлографические исследования сварного соединения) контроля, применяемые при изготовлении сварных конструкций АЭС.

[1] *Основные положения по сварке и наплавке узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок* ОП 1513-72. URL: https://docs.cntd.ru/document/564412851 (дата обращения: 02.08.2023).

[2] *Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок* НП-104-18. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 554 от 14.11.2018 г. Консультант плюс. URL: https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-14112018-n-554-ob/np-104-18/ (дата обращения: 02.08.2023).

С учетом технологических возможностей СТ на первом этапе была опробована технология сборки без подготовки кромок в виде «классического» таврового соединения (рис. 2 *а*) [11]. Параметры режима сварки были выбраны в соответствии с рекомендациями, изложенными в [11].

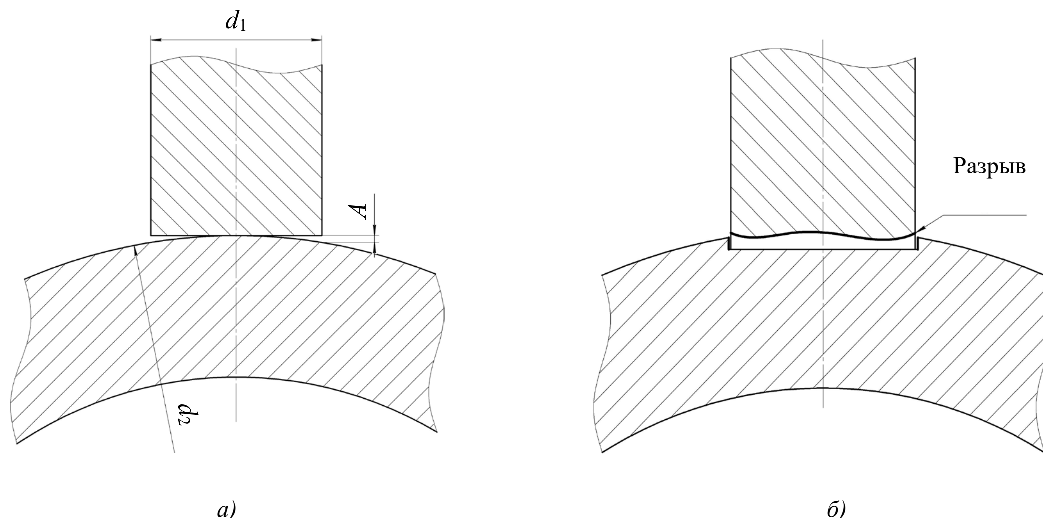


Рис. 2. Имитаторы штуцерного узла: *а* — имитатор таврового соединения; *б* — соединение с предварительной выточкой канавки: d_1 — диаметр имитатора штуцера; d_2 — диаметр имитатора корпуса; *A* — зазор

Результаты исследования. Контроль качества показал, что сборка штуцера и цилиндрического корпуса оборудования обеспечивает получение между корпусом и штуцером зазора *A*, величина которого меняется в зависимости от диаметра корпуса d_2 и штуцера d_1. Такая форма стыка не обеспечивает равномерного нагрева контактирующей поверхности, что приводит к образованию участков пластичного материала и проскальзыванию их с нарушением сварного стыка.

Учитывая отрицательные результаты СТ на первом этапе, на втором этапе была предложена и отработана технология сварки трением с предварительной выточкой канавки на корпусе (рис. 2 *б*). Как показали результаты экспериментов, в начальной стадии сварки произошел разогрев кольцевой части, нарушение центровки и последующий отрыв нижней части имитатора штуцера, что в конечном итоге привело к формированию бесформенного сварного соединения.

В ходе проведенных экспериментальных исследований было выявлено, что для получения качественного сварного соединения основания большой толщины с некоторым радиусом кривизны и толстостенного штуцера малого диаметра, полученного способом сварки трением, необходимо:

– разработать конструкцию соединяемых поверхностей, обеспечивающую надежное соединение и высокие механические характеристики сварного соединения штуцеров малого диаметра в состоянии без последующей термической обработки или с термообработкой до более низких температур;

– обеспечить оптимальный нагрев стыкуемых поверхностей за счет применения обоснованных значений параметров режима сварки.

Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует о необходимости разработки конструкции соединяемых поверхностей, которые обеспечат более равномерный нагрев и формирование при СТ качественного соединения. Одним из вариантов получения такого соединения была выбрана коническая форма поверхностей [12–15].

В процессе выбора оптимальной контактирующей поверхности выполнен поверочный расчет прочности сварных соединений цилиндрической и конической форм (рис. 3). Расчеты для цилиндрической поверхности производили по формуле [16]:

$$N_ц = \left[\sigma_p\right] \cdot L \cdot S, \qquad (1)$$

где $[\sigma_P]$ — предел прочности, МПа; *L* — длина сварного шва, мм; *S* — толщина сварного шва, мм.

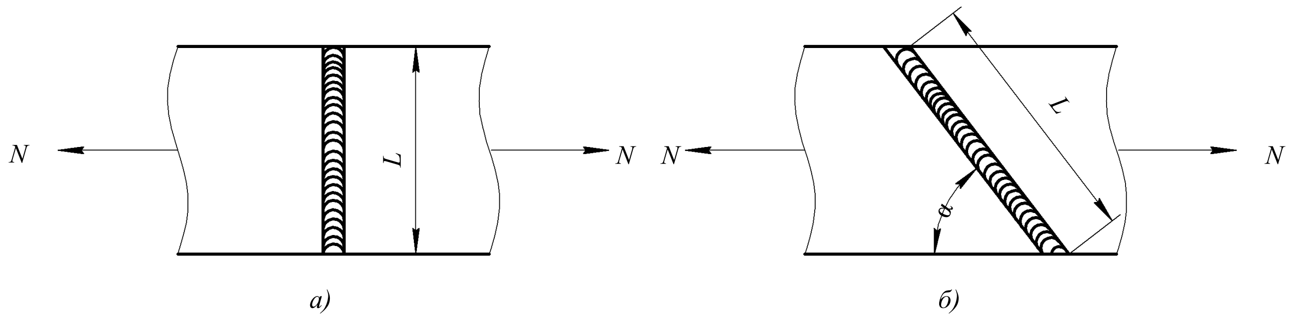


Рис. 3. Типы сварных соединений: *а* — цилиндрическая соединяемая поверхность; *б* — коническая соединяемая поверхность: *N* — нагрузка; *L* — длина сварного шва; α — угол соединяемых поверхностей

Расчеты для конической поверхности производили по формуле:

$$N_к = \frac{[\sigma_P] \cdot L \cdot S}{\sin \alpha} \quad (2)$$

Можно увидеть, что наименьшая длина сварного соединения и величина разрушающей нагрузки характерна для модели с цилиндрической контактной поверхностью. При переходе к конусной поверхности контакта длина сварного соединения и величина разрушающей нагрузки *N* закономерно увеличиваются. Эти характеристики напрямую зависят от величины угла α, оптимальный диапазон которой по результатам расчетов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Влияние угла наклона α на показатели прочности

Тип соединения	Угол наклона, α,°	Нагрузка *N*, Н
Цилиндрический	–	59 283
Конический	30,0	118 566
	32,5	110 396
	35,0	101 609
	37,5	97 396
	40,0	94 959

Следует отметить, что необоснованное изменение величины α как в большую, так и в меньшую сторону будет приводить к снижению прочности (при уменьшении длины сварного шва) или увеличению перегрева и величины сварочных деформаций (при увеличении длины сварного шва).

В этой связи предложено использовать конусную контактирующую поверхность с одной стороны — на штуцере, с другой — ответную конусную поверхность на корпусе (рис. 4 *а*).

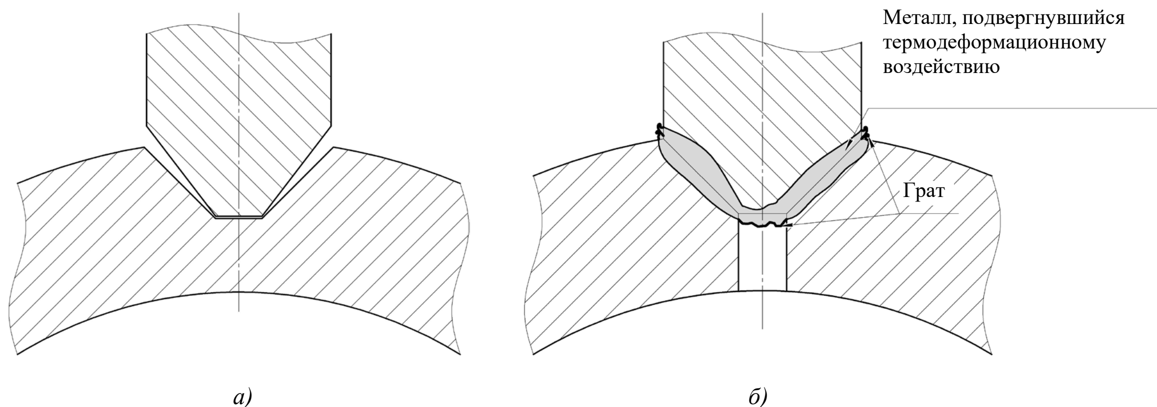


Рис. 4. Штуцерный узел: *а* — форма контактирующей поверхности; *б* — выполненное сварное соединение

Данная конструкция позволяет выполнять сварные соединения вне зависимости от диаметра корпуса, так как пластичный металл в процессе сварки равномерно заполняет соединяемую поверхность (рис. 4 *б*).

Так как разработанная конструкция обеспечивает равномерное заполнение разделки сварного соединения вне зависимости от формы корпуса, было предложено использовать плоскую поверхность корпуса для дальнейших экспериментальных исследований. Было выполнено конструирование и изготовление моделей штуцеров с разными углами конусной поверхности (рис. 5).

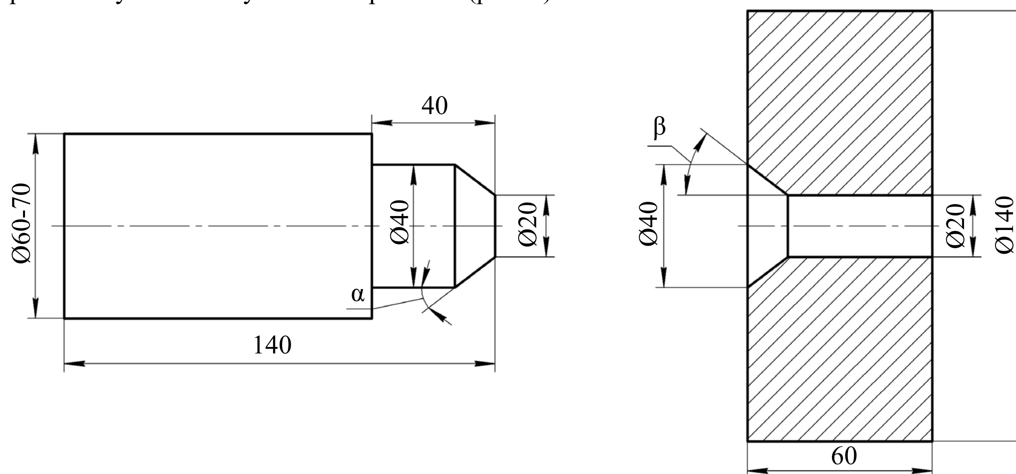


Рис. 5. Модель штуцерного узла: α — угол конуса штуцера; β — угол конуса корпуса

Размеры углов сопрягаемых поверхностей стыка были выбраны с учетом результатов расчетов, а также энергетической возможности сварочной машины МСТ-41 и ожидаемых размеров сварного соединения [18].

При подготовке поверхностей элементов моделей под сварку с углами конуса α = 30,0°; 32,5°; 35,0°; 37,5° и 40,0° сварные соединения качественно формировались при обосновано выбранных параметрах режима СТ. При этом наиболее качественное соединение получалось с углом поверхности 37,5°.

В ходе экспериментальных исследований была выявлена закономерность при формировании сварного соединения, а именно, происходил поэтапный процесс трения, нагрева и пластического деформирования по поверхности сварного соединения. Данные отличия от известных способов формирования соединений при СТ не позволяют использовать классическую циклограмму процесса сварки [11]. Это потребовало более детального изучения последовательности формирования соединения и описания циклограммы процесса в соответствии со спецификой (рис. 6)

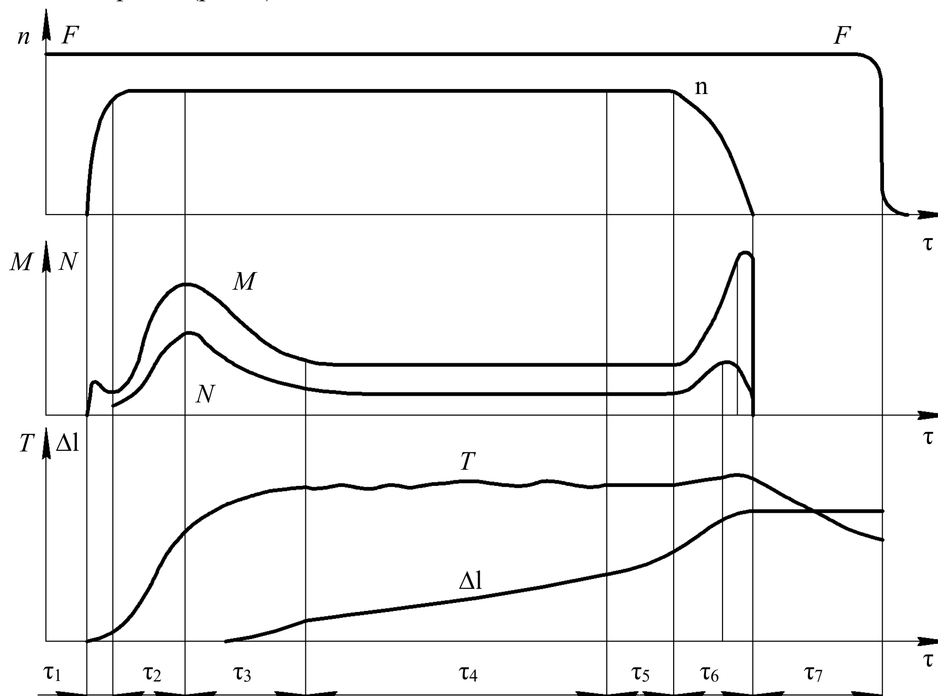


Рис. 6. Циклограмма процесса СТ:
n — угловая скорость; *F* — давление нагрева; *M* — момент трения; *N* — мощность тепловыделения; *T* — температура в зоне соединения; Δl — осадка; τ_1–τ_7 — фазы цикла

В процессе сварки фазы τ_1, τ_2, τ_3 схожи с первоначальными фазами СТ цилиндрических поверхностей. В первой фазе происходит притирка поверхности по отдельным микровыступам, но, в отличии от класических способов, притирка идет не по всей поверхности, а только на соприкасаемом с конусом участке. Во второй фазе происходит увеличение площади контактирующих поверхностей и, в следствие этого, рост температуры. Третья фаза характеризуется подъемом температуры и выделением пластифицированного металла (грата). Четвертая фаза τ_4 — фаза последовательного нагрева всей конусной поверхности. В данной фазе происходит частичный повтор процессов, протекающих во второй и третьей фазах. Отличие заключается в том, что участки, вступающие в процесс нагрева, уже частично подогреты. В пятой фазе τ_5 наступает процесс равномерного нагрева всей свариваемой поверхности, близкий к квазистационарному состоянию. Шестая τ_6 и седьмая τ_7 — фазы торможения и проковки, в которых происходит процесс полной остановки вращения и сжатия.

Реализация указанной циклограммы возможна при использовании разработанной методики расчета параметров режима сварки трением [17]. К основным параметрам относятся: время сварки t_c, давление нагрева $P_н$, скорость вращения V и давление проковки $P_п$. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры процесса СТ модели штуцера

Материал	Номер образца	Давление нагрева, МПа	Давление проковки, МПа	Скорость вращения, об/мин	Время сварки, с
Сталь 10ГН2МФА	10–1	0,323	0,539	1200	27
	10–2	0,367	0,539	1200	32
	10–3	0,340	0,539	1200	30

За счет последовательного включения в стадию нагрева кольцевых участков конической поверхности соединяемых деталей можно значительно уменьшить величину давления нагрева и увеличить время сварки.

Предложенные технологические решения позволяют получить качественные соединения при меньших параметрах режима, что снижает тепловложение в сварном шве, обеспечивая надежное соединение и минимальный рост зерна. Кроме того, при таком способе сварки вступающие в нагрев кольцевые участки в месте трения имеют прослойку из пластичного металла из предыдущего слоя, который выступает в роли смазывающего материала. Это снижает коэффициент трения и, тем самым, уменьшает требуемую мощность сварочной машины.

Авторами был выполнен контроль сварных соединений неразрушающими и разрушающими методами. Результаты контроля качества и механические свойства сварных соединений приведены в таблице 3. Результаты измерения твердости (рис. 7) и микроструктура (рис. 8) выполненных сварных соединений удовлетворяют требованиям нормативно-технических документов[3].

Значения твердости во всех образцах указывают на достаточно однородную структуру по всему сечению шва. Значений твердости, соответствующих твердости закалочных структур, не выявлено. На рис. 7 наблюдается небольшое увеличение твердости по линии сплавления. Для выравнивания значений по сечению соединения рекомендуется провести термообработку — термофиксацию.

Таблица 3

Результаты механических испытаний, рентгенографического и ультразвукового контроля выполненных сварных соединений штуцеров

Марка стали	Номер образца	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение ψ, %	Угол загиба	Ударная вязкость KCV, Дж/м^2	Контроль РГД	Контроль УЗК
10ГН2МФА	10–1	635	595	14–17	70–78	123	251	уд	уд
	10–2	510	425	12–16	67–71	127	195	уд	уд
	10–3	770	650	15	68–70	125	273	уд	уд

[3] *Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже. НП-105-18.* Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 554 от 14.11.2018 г. URL: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/%D0%9D%D0%9F-105-18/%D0%9D%D0%9F-105-18.pdf (дата обращения: 10.09.2023).

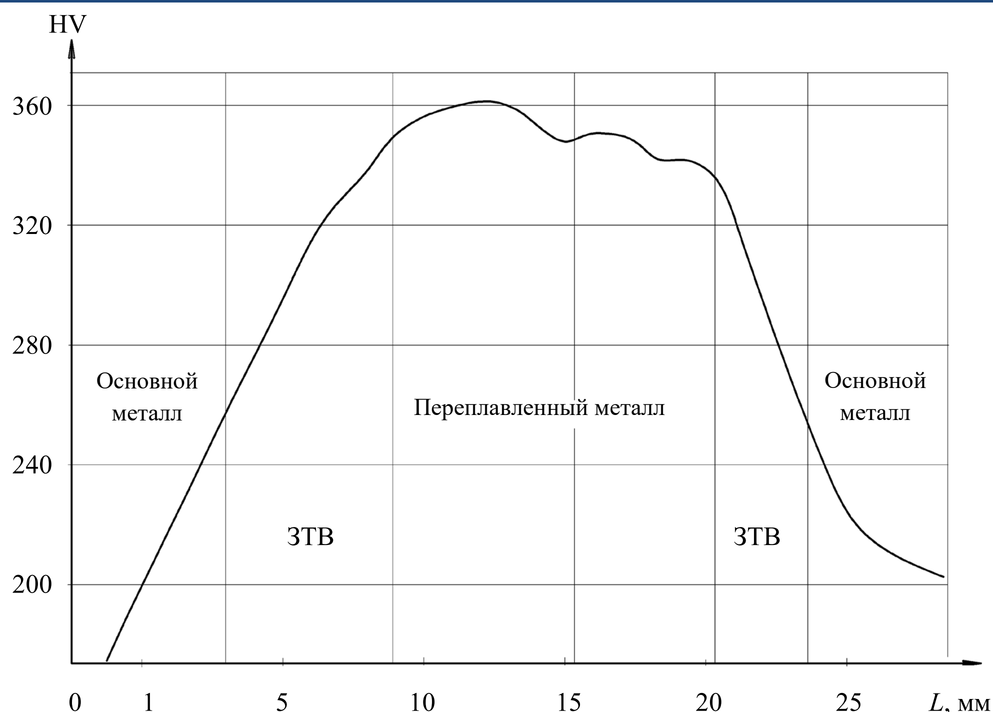


Рис. 7. Распределение твердости по ширине сварного соединения из стали 10ГН2МФА (ЗТВ — зона термического влияния)

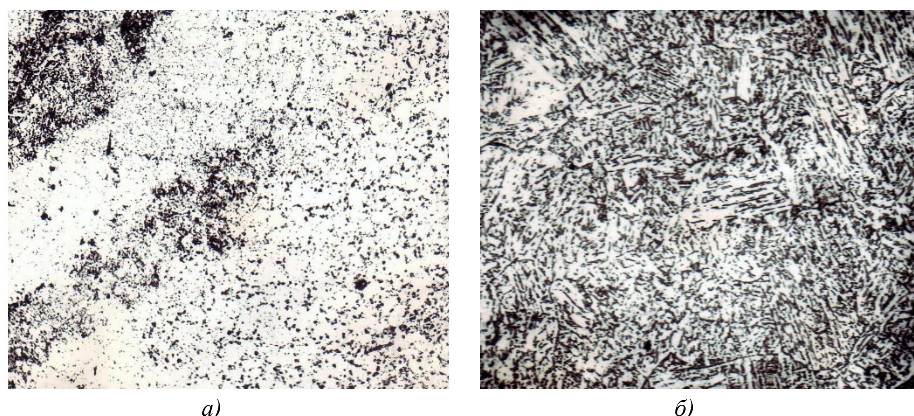


Рис. 8. Микроструктура различных зон сварного соединения из стали 10ГН2МФА, выполненного сваркой трением (×500): *а* — зона термического влияния; *б* — линия сплавления

Обсуждение и заключение. Высокое и стабильное качество сварного соединения достигается за счет оптимального тепловложения при сварке трением контактирующих поверхностей путем последовательного включения в процесс нагрева и трения кольцевых участков конусных сварных соединений. Это способствует измельчению структуры металла шва и зоны термического влияния и получению высоких механических свойств металла сварного соединения.

В результате экспериментального исследования установлено положительное влияние основных конструктивных и технологических факторов и, прежде всего, конусной формы соединяемых поверхностей на качество толстостенных сварных соединений штуцеров малого диаметра (до 80 мм). Полученные положительные результаты разрушающего и неразрушающего контроля подтверждают требуемое качество и перспективность применения сварки трением сварных соединений штуцеров с конусной поверхностью при изготовлении оборудования АЭС.

Список литературы

1. Сабитов М.Х., Поникаров С.И., Валеев С.И. Оценка ресурса безопасной эксплуатации газосепараторов с дефектами угловых сварных швов приварки штуцеров. *Вестник Казанского технологического университета*. 2013;16(15):118–120. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-resursa-bezopasnoy-ekspluatatsii-g-azoseparatorov-s-defektami-uglovyh-svarnyh-shvov-privarki-shtutserov/viewer (дата обращения: 20.08.2023).

2. Ермолаев В.В., Жученко Л.А., Любимов А.А., Гладштейн В.И., Кремер В.Л. Опыт реконструкции турбины ПТ–60–90 с проведением восстановительной термообработки корпуса цилиндра высокого давления. *Теплоэнергетика*. 2018;(6):5–14. https://doi.org/10.1134/S004036361806005X

3. Миронова Л.И., Федик И.И. Локальное тепловое нагружение двух пересекающихся цилиндрических оболочек вращения с переменной толщиной стенки. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2015;(1):83–87.

4. Ельчанинов А.А., Корчагин И.Б. Проектирование приспособления для приварки штуцеровки теплообменному аппарату. В: Т*руды победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий «Научная опора Воронежской области»*. Воронеж: Воронежский государственный технический университет; 2020. С. 224–226. URL: https://studfile.net/preview/16729056/page:23/ (дата обращения: 28.08.2023).

5. Dolgachev Yu.V., Pustovoit V.N. Interaction of Ferromagnetically Ordered Clusters with Dislocations in Austenite and Twinning. *Materials Science Forum*. 2022;1052:134–139. https://doi.org/10.4028/p-a8jty9

6. Assaulenko S.S., Lyudmirsky Yu.G., Kharchenko V.Y., Chernogorov A.L. Computer-Digital Technique for Evaluating the Geometry of the Interface of the Weld with the Base Metal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;1001:012038. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012038

7. Cleiton Carvalho Silva, Arlindo Braga de Souza Neto, Francisco Diego Araruna da Silva, Francisco Edval Sampaio de Freitas Júnior, Jesualdo Pereira Farias. Welding of ASTM A106 Gr. B Steel Pipes for High-Temperature Service — Part 1 — Residual Stress Analysis. *Welding International*. 2009;23(4):270–281. https://doi.org/10.1080/09507110802543476

8. Maodong Kang, Ming Jiang, Soumya Sridar, Wei Xiong, Zhixiong Xie, Jun Wang. Effect of Multiple Repair Welding on Crack Susceptibility and Mechanical Properties of Inconel 718 Alloy Casting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022;31(1):254–261. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06173-6

9. Kaimeng Wang, Hongyang Jing, Lianyong Xu, Lei Zhao, Yongdian Han, Kai Song, et al. Fracture Mechanism of a Ni-Base Alloy under High-Temperature Cyclic Deformation: Experiments and Microstructure Characterization. *Materials Characterization.* 2022;189:111944. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111944

10. Lyudmirskii YuG, Assaulenko SS, Ageev SO. Constructive and Technological Method of Increasing Durability of “Choke Connections”. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:042061. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042061

11. Гнюсов С.Ф., Хазанов И.О., Советченко Б.Ф., Дегтяренко Е.А., Киселёв А.С., Трущенко Е.А. и др. *Применение эффекта сверхпластичности сталей в инструментальном производстве*. Монография. Томск: Изд-во науч.-технической лит.; 2008. 237 с.

12. Poletaev Yu.V., Poletaev V.Yu., Shchepkin V.V. Friction Welding of Fittings and Nozzles from Low-Alloy Steel 15Х2НМФА. *Welding International*. 2020;34(1–3):29–33. https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1919446

13. Shchepkin V., Poletaev Yu. Friction Welding of Fasteners from Austenite Steels. *E3S Web of Conferences*. 2020;210:08012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021008012

14. Schepkin V., Poletaev Yu. Friction Welding of Carbon Quality Steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:042062. http://10.1088/1742-6596/2131/4/042062

15. Полетаев Ю.В., Полетаев В.Ю., Щепкин В.В. Сварка трением штуцеров и патрубков из низколегированной стали 15Х2НМФА. *Сварочное производство*. 2018;(7):13–18.

16. Коновалов А.В., Куркин А.С., Макаров Э.Л., Неровный В.М., Якушкин Б.Ф. *Теория сварочных процессов.* Неровный В.М. (ред.) Москва: Издательство Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 2007. 752 с.

17. Щепкин В.В., Полетаев Ю.В., Рогозин Д.В. Метод расчета параметров режима сварки трением соединений конической формы. В: *Труды XXIV Международной научно-практической конференции в рамках Агропромышленного форума юга России «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса», выставок «Интерагромаш», «Агротехнологии».* Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ; 2021. С. 490–493. https://doi.org/10.23947/interagro.2021.490-493

References

1. Sabitov MKh, Ponikarov SI, Valeev SI. Assessment of the Resource of Safe Operation of Gas Separators with Defects in Fillet Weld Fitting Welding. *Herald of Kazan Technological University*. 2013;16(15):118–120. https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-resursa-bezopasnoy-ekspluatatsii-g-azoseparatorov-s-defektami-uglovyh-svarnyh-shvov-privarki-shtutserov/viewer (accessed: 20.08.2023). (In Russ.)

2. Ermolaev VV, Zhuchenko LA, Lyubimov AA, Gladshtein VI, Kremet VL. Experience in Reconstructing the PT-60-90 Turbine Reconstruction of the Turbine PT-60-90 by Reconditioning Heat Treatment of the High-Pressure Cylinder Shell. *Thermal Engineering*. 2018;(6):5–14. https://doi.org/10.1134/S004036361806005X

3. Mironova LI, Fedik II. Local Thermal Loading of Two Intersecting Cylindrical Rotational Shells with a Variable Wall Thickness. *Engineering and Automation Problems*. 2015;(1):83–87.

4. Elchaninov AA, Korchagin IB. Design of a Device for Welding Fittings to a Heat Exchanger. In: *Collection of Works of the Winners of the Competition of Research Works of Students and Graduate Students of VSTU in Priority Areas for the Development of Science and Technology.* Voronezh: Voronezh State Technical University; 2020. P. 224–226. https://studfile.net/preview/16729056/page:23/ (accessed: 28.08.2023). (In Russ.)

5. Dolgachev YuV, Pustovoit VN. Interaction of Ferromagnetically Ordered Clusters with Dislocations in Austenite and Twinning. *Materials Science Forum*. 2022;1052:134–139. https://doi.org/10.4028/p-a8jty9

6. Assaulenko SS, Lyudmirsky YG, Kharchenko VY, Chernogorov AL. Computer-Digital Technique for Evaluating the Geometry of the Interface of the Weld with the Base Metal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;1001:012038. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012038

7. Cleiton Carvalho Silva, Arlindo Braga de Souza Neto, Francisco Diego Araruna da Silva, Francisco Edval Sampaio de Freitas Júnior, Jesualdo Pereira Farias. Welding of ASTM A106 Gr. B Steel Pipes for High-Temperature Service — Part 1 — Residual Stress Analysis. *Welding International*. 2009;23(4):270–281. https://doi.org/10.1080/09507110802543476

8. Maodong Kang, Ming Jiang, Soumya Sridar, Wei Xiong, Zhixiong Xie, Jun Wang. Effect of Multiple Repair Welding on Crack Susceptibility and Mechanical Properties of Inconel 718 Alloy Casting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022;31(1):254–261. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06173-6

9. Kaimeng Wang, Hongyang Jing, Lianyong Xu, Lei Zhao, Yongdian Han, Kai Song, et al. Fracture Mechanism of a Ni-Base Alloy under High-Temperature Cyclic Deformation: Experiments and Microstructure Characterization. *Materials Characterization.* 2022;189:111944. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111944

10. Lyudmirskii YuG, Assaulenko SS, Ageev SO. Constructive and Technological Method of Increasing Durability of “Choke Connections”. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:042061. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042061

11. Gnyusov SF, Khazanov IO, Sovetchenko BF, Degtyarenko EA, Kiselev AS, Trushchenko EA, et al. *Application of the Effect of Superplasticity of Steels in Tool Production*. Monograph. Tomsk: NTL Publishing House; 2008. 240 p. (In Russ.)

12. Poletaev YuV, Poletaev VYu, Shchepkin VV. Friction Welding of Fittings and Nozzles from Low-Alloy Steel 15X2HMFA. *Welding International*. 2020;34(1–3):29–33. https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1919446

13. Shchepkin V, Poletaev Yu. Friction Welding of Fasteners from Austenite Steels. *E3S Web of Conferences*. 2020;210:08012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021008012

14. Schepkin V, Poletaev Yu. Friction Welding of Carbon Quality Steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:042062. https://doi/org/10.1088/1742-6596/2131/4/042062

15. Poletaev YuV, Poletaev VYu, Shchepkin VV. Friction Welding of Fittings and Branch Pipes from Low-Alloy Steel 15Kh2NMFA. *Welding Production*. 2018;(7):13–18. (In Russ.)

16. Konovalov AV, Kurkin AS, Makarov EL, Nerovnyi VM, Yakushkin BF. *Theory of Welding Processes*. VM Nerovnyi (ed). Moscow: Bauman University Publ. House; 2007. 752 p. (In Russ.)

17. Shchepkin VV, Poletaev YuV, Rogozin DV. Method for Calculating the Parameters of the Friction Welding Mode of Conical Connections. In: *Proc. XXIV Int. Sci.-Pract. Conf. within the Framework of the Agro-Industrial Forum of the South of Russia, Exhibitions “Interagromash”, “Agrotechnologies”.* Rostov-on-Don: DSTU-PRINT; 2021. P. 490–493. https://doi.org/10.23947/interagro.2021.490-493 (In Russ.)

Поступила в редакцию 02.09.2023
Поступила после рецензирования 30.09.2023
Принята к публикации 17.10.2023

Об авторах:

Юрий Вениаминович Полетаев, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры машин и автоматизации сварочного производства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 7763-3543, ScopusID, ORCID, anclav51@mail.ru

Виктор Викторович Щепкин, ассистент кафедры машин и автоматизации сварочного производства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 2093-6094, ScopusID, ORCID, shepkinviktor@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

В.В. Щепкин — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Ю.В. Полетаев — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 02.09.2023
Revised 30.09.2023
Accepted 17.10.2023

About the Authors:

Yuri V. Poletaev, Dr.Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, Professor of the Welding Fabrication Machines and Automation, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 7763-3543, ScopusID, ORCID, anclav51@mail.ru

Viktor V. Shchepkin, Teaching assistant of the Welding Fabrication Machines and Automation, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 2093-6094, ScopusID, ORCID, shepkinviktor@rambler.ru

Claimed contributorship:

VV Shchepkin: basic concept formulation, research objective and tasks, calculations, text preparation, formulation of conclusions.

YuV Poletaev: academic advising, analysis of research results, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE




УДК 673.7
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-387-397

Научная статья



EDN: LRSXPY

Влияние армирования стекловолокном на механические свойства полиэстерных композитов

И.Р. Антибас
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ Imad.antypas@mail.ru

Аннотация
Введение. Стекловолокна существенно улучшают качество композитных материалов, делают их легче, прочнее, устойчивее к коррозии и термически стабильнее. В научной и прикладной литературе активно обсуждаются сильные и слабые стороны конкретных композитов. При этом недостаточно исследовано влияние соотношения волокон и материала матрицы на механические характеристики композитов. Представленная работа призвана восполнить этот пробел. Цели исследования — изготовление композиционного материала на полимерной основе, армированного стекловолокном, а также изучение влияния весовых соотношений элементов на механические характеристики композита. Впервые публикуется отчет о сопоставлении характеристик композитов (с различным содержанием волокна) друг с другом и со сталью.
Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовались стекловолокно и полиэстер с добавлением медиатора для ускорения процесса формования. Образцы изготавливались вручную и при помощи стандартного оборудования испытывались на растяжение, твердость и ударную прочность. Результаты обобщали в виде таблиц, визуализировали в виде графиков и обрабатывали методом сравнительного анализа.
Результаты исследования. Показаны способ создания образцов и методы их испытаний. Изыскания позволили установить, что твердость, прочность на разрыв и устойчивость к удару возрастают с увеличением процентного содержания случайно распределенного стекловолокна до 50 % при 50 % ненасыщенного полиэстера. В этом случае достигаются максимальные значения прочности на разрыв — 175,4 МПа, твердости — 38 HV и ударопрочности — 1,56 Дж/мм^2. Экспериментально доказана нецелесообразность превышения доли стекловолокна более чем на 50 %, т. к. механические свойства ухудшаются. Это объясняется, в частности, хрупкостью стекла, которая при нарушении пропорций передается всему композиту. Кроме того, при чрезмерно высоком объеме армирующих волокон смолы будет недостаточно для качественного скрепления элементов, что существенно снизит прочность материала. Большинство механических характеристик композита из 50 % полиэстера и 50 % стекловолокна лучше, чем у стали.
Обсуждение и заключение. Доказано, что свойства композитного материала существенно зависят от содержания стекловолокна. Полученный композит сравнили со сталью. Выяснилось, что он обладает лучшими механическими характеристиками и меньшим весом. Это позволяет рекомендовать использовать данный материал для изготовления корпусов лодок.

Ключевые слова: армирование стекловолокном, соотношение полиэстера и стекловолокна в композите, механические характеристики композита, сравнение композитных и стальных образцов

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования: Антибас И.Р. Влияние армирования стекловолокном на механические свойства полиэстерных композитов. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2023;23(4):387–397. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-387-397

Original article

Effect of Glass Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Polyester Composites

Imad Rezakalla Antypas
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ Imad.antypas@mail.ru

Abstract

Introduction. Glass fibers significantly improve the quality of composite materials, make them lighter, stronger, more corrosion resistant and thermally stable. Strengths and weaknesses of specific composites are actively discussed in the scientific and applied literature. At the same time, the effect of the ratio of fibers and matrix material on the mechanical characteristics of composites has not been sufficiently investigated. The presented study is intended to fill this gap. The work is aimed at manufacturing a composite material on a polymer basis reinforced with glass fiber, and investigating the influence of weight ratios of elements on the mechanical characteristics of the composite. For the first time, a report on the comparison of the characteristics of composites (with different fiber content) to each other and to steel is published.

Materials and Methods. Fiberglass and polyester were used as starting materials with the addition of a mediator to speed up the molding process. The samples were made manually and tested for tensile strength, hardness, and impact strength using standard equipment. The results were summarized in the form of tables, visualized in the form of graphs, and processed by comparative analysis.

Results. The technique of creating samples and methods of their testing were described. The research showed that hardness, tensile strength and impact resistance increased with a growth in the percentage of randomly distributed fiberglass to 50% with 50% unsaturated polyester. In this case, the maximum values of tensile strength — 175.4 MPa, hardness — 38 HV and impact resistance — 1.56 J/mm^2 were obtained. The inexpediency of exceeding the proportion of fiberglass by more than 50% was experimentally proven, since mechanical properties deteriorated. This was due, in particular, to the fragility of the glass, which, if the proportions were violated, was transmitted to the entire composite. In addition, with an excessively high volume of reinforcing fibers, the resin was not enough for high-quality bonding of the elements, which significantly reduced the strength of the material. Most of the mechanical characteristics of a composite made of 50% polyester and 50% fiberglass are better than those of steel.

Discussion and Conclusion. It has been proved that the properties of the composite material depend significantly on the glass fiber content. The resulting composite was compared to steel. It turned out that it had better mechanical characteristics and less weight. This allows us to recommend the material for boat hulls.

Keywords: glass fiber reinforcement, ratio of polyester to glass fiber in a composite, mechanical characteristics of a composite, comparison of composite and steel samples

Acknowledgements. The author would like to thank the Editorial board of the journal and the reviewers for their attentive attitude to the article, and comments that helped to improve the quality of the article.

For citation. Antypas IR. Effect of Glass Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Polyester Composites. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2023;23(4): 387–397. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-387-397

Введение. Полимеры привлекательны как матрицы композитов благодаря сравнительно низкой плотности, легкости в обработке и превосходным механическим свойствам. Высокотемпературные смолы используются для производства самолетов, ракет, лодок и другой техники. Арматура (стекловолокно) воспринимает основную нагрузку, особенно если композит состоит из волокон, рассредоточенных в слабой матрице (пример — углеродно-эпоксидный композит). Таким образом, прочность и жесткость материала определяются прочностью и жесткостью волокон [1–4]. Основные преимущества композитов, армированных стекловолокном, — высокие прочность и модуль упругости. Благодаря низкому удельному весу, хорошему соотношению прочности и веса, эти материалы превосходят металлы. Кроме того, выверенное соотношение усталостной прочности и веса существенно повышает устойчивость многих композитных ламинатов к усталостным повреждениям [5, 6].

Авторы [7] доказали, что механические показатели композитов, армированных волокнами, зависят от свойств материалов, входящих в их состав (тип, количество, распределение и ориентация волокон, пустоты). Важную роль играют также природа межфазных связей и механизмы передачи нагрузки на границе раздела фаз.

Исследования [8] показали, что прочность на разрыв пластин из стеклопластика изменяется в зависимости от условий окружающей среды. В работе [9] рассматривались два типа композита с разным армированием стекловолокном: рубленым и смешанным с ненасыщенной полиэфирной смолой (стекловолокно 0/90).

Установлено, что композит, армированный рубленым стекловолокном, имел более высокий модуль упругости, максимальное напряжение и предел текучести, чем композит, армированный стекловолокном 0/90.

Авторы научных работ концентрировали внимание на особенностях различных типов стекловолокна и материалов матриц. При этом недостаточно исследована зависимость качества композита от соотношения объемов волокон и материала матрицы.

В представленной статье качества материалов сопоставляются по двум направлениям. Первая параллель — композиты с разным соотношением волокон и матрицы. Вторая — композит и сталь. Данные публикуются впервые.

Цель исследования заключалась в изучении влияния содержания стекловолокна на механические свойства материала, то есть на его поведение при нагрузке. Оценивались твердость, устойчивость к разрывам и ударам.

Материалы и методы. Для изготовления образцов в качестве исходных материалов использовали смолу (полиэстер) с добавлением веществ, ускоряющих реакцию, и стекловолокно (рис. 1).



Рис. 1. Стекловолокно

Полученные образцы испытывали на растяжение, твердость и ударную нагрузку. Аналогичные опыты проводились на стальных деталях. Каждый эксперимент повторялся пятикратно. От испытания к испытанию увеличивали процентное содержание стекловолокна, а затем брали средние значения результатов.

В таблице 1 приведены механико-физические свойства используемого стекловолокна.

Таблица 1

Механико-физические свойства стекловолокна [10]

Показатель	Значение
Плотность, кг/м^3	2500
Предел прочности, МПа	2400
Модуль упругости, ГПа	85
Удлинение, %	0,01

В качестве основного материала использовался ненасыщенный полиэстер, который при комнатной температуре представляет собой вязкую жидкость. Его механические свойства представлены в таблице 2.

Таблица 2

Механические свойства полиэстера [10]

Показатель	Значение
Плотность, кг/м^3	1200
Предел прочности, МПа	42
Модуль упругости, ГПа	2,8
Удлинение, %	3,2

Вспомогательные материалы. К ненасыщенному полиэстеру добавлялись следующие вещества [11]:

– кобальтовый жидкий материал для упрочнения (3–4 %);

– медиатор — стимулирующее вещество, используемое с целью ускорения осаждения (1,5–3 %).

Измерение плотности стекловолокна. Для определения плотности стекловолокна его погружали в воду в стандартном контейнере. Полученное значение $\rho = 2500$ кг/м^3 совпало с эталонным.

Испытание стекловолокна на растяжение. Средний диаметр волокон выяснили с помощью микроскопа — 20,14 мкм. Рассчитав поперечное сечение одного волокна, определили их среднее число в пучке,

сравнивая массы волокон и пучка, из которого их взяли. Среднее число волокон в пучке оказалось равным 2200. Затем в зависимости от количества волокон рассчитали сечение пучка A = 0,7 мм^2.

Эксперименты затруднялись обрывами в местах крепления из-за хрупкости волокон. Давление зажимов растягивающего устройства на концы волокон снизили следующим образом. Специальную бумагу с хорошей впитывающей способностью залили смолистым материалом, поместили в него волокна и оставили при комнатной температуре до полного высыхания. Затем бумагу разрезали и получили образцы из пучков волокон, готовых к испытаниям (рис. 2).

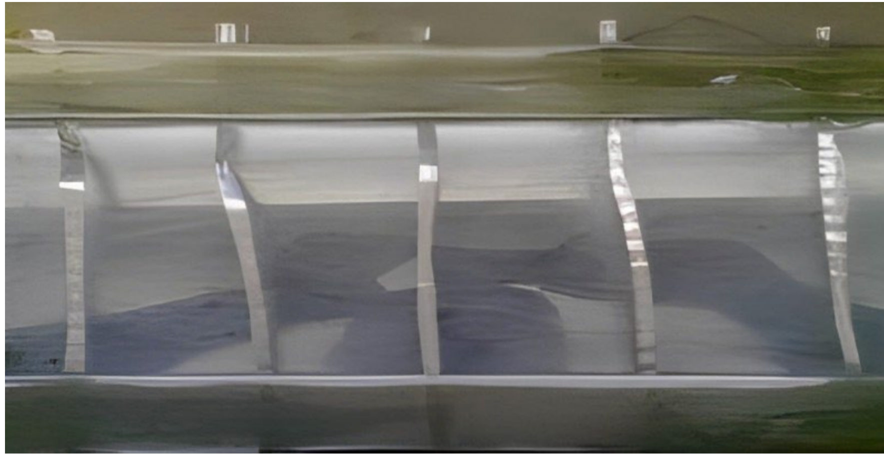


Рис. 2. Образцы волокон на растяжение

Размеры образцов на растяжение определялись в соответствии с указаниями международных стандартов ASTM D 2343–95[1] для таких испытаний. Параметры экспериментов: длина волокон между оправками — 25 см, длина оправок на обоих концах — 5 см, скорость приложения растягивающей нагрузки — 12,7 м/с, лабораторная температура — 23°C.

Результаты исследования.

Изготовление образцов. Изготовили образцы с различным массовым содержанием стекловолокна (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % и 60 %). Для этого смесь из 5 % полиэстера, кобальта и катализатора готовилась при комнатной температуре. Некоторое ее количество равномерно распределяли кистью по внутренней поверхности формы. Затем наносили слой со случайно распределенными стекловолокнами. Далее слои волокон пропитывались смесью и накладывались друг на друга, пока не получался окончательный образец соответствующих пропорций (рис. 3, 4).



а) *б*)

Рис. 3. Формы образцов: *а* — изготовление; *б* — готовые

[1] Standard Test Method for Tensile Properties of Glass Fiber Strands, Yarns, and Rovings Used in Reinforced Plastics. Англ. Стандартный метод испытания свойств на растяжение прядей, пряжи и ровингов из стекловолокна, используемых в армированных пластмассах. URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/3930/2180b1c23fb041fe88bcfd3fba3fe2f6/ASTM-D2343-95.pdf (дата обращения: 27.09.2023).

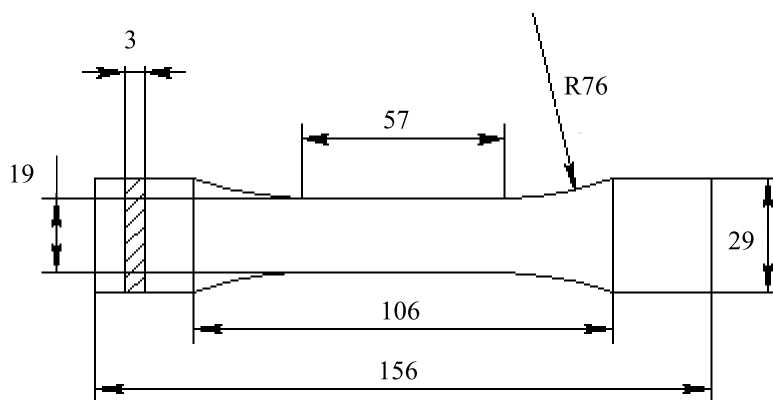


Рис. 4. Форма стандартного образца

Готовые образцы доставали из формы, очищали и помещали в сухую среду на 24 часа.

Испытания на растяжение. Испытания на растяжение проводили в соответствии с ISO 326 ASTMD 638[2], как показано на рис. 5. Образец прочно закреплялся на обоих концах растяжного устройства. К нему постепенно прикладывалась растягивающая нагрузка от нуля до 20 Н/мин, пока образец не разрушался.



Рис. 5. Растяжное устройство

Процесс растяжения разделялся на три области. В первой происходило скольжение между губками зажима и поверхностями образца, поэтому образцы хорошо зажимались. Во второй области из-за упругого поведения контактирующих поверхностей материалов наблюдалась прямая зависимость между напряжением и деформацией. Третья область — после разрушения образца. Оно не было ни полным, ни внезапным, потому что шло равномерно в зависимости от углов ориентации волокон в слоях стекломата. В результате получили показатели максимальной прочности на разрыв и упругой деформации образцов.

Предел прочности при растяжении σ_C^R, который выражает напряжение разрушения композиционного материала, рассчитывался по соотношению [12]:

$$\sigma_C^R = \frac{F_{\max}}{B \cdot e},$$

где F_{max} — максимальная сила, которая привела к разрушению образца, Н; B — ширина образца, мм; e — толщина образца, мм.

На рис. 6 показаны результаты испытаний стекловолокна при растяжении.

[2] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Англ. Стандартный метод испытания свойств пластмасс на растяжение. URL: https://tienda.aenor.com/norma-astm-d638-99-017910 (дата обращения: 27.09.2023).

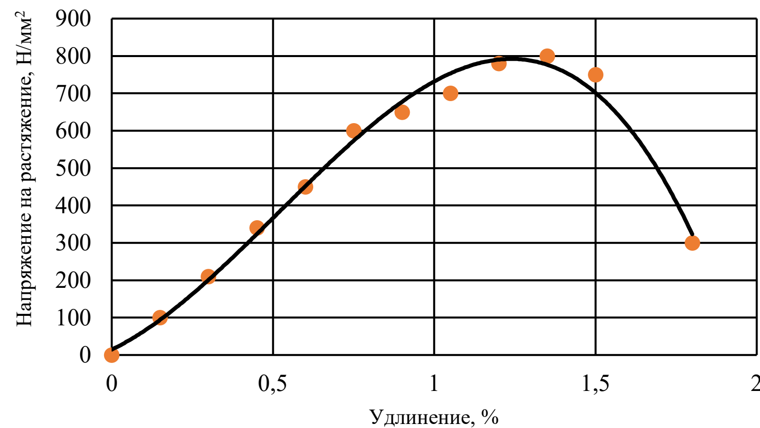


Рис. 6. Поведение волокон при растяжении

По данным рис. 6 рассчитали значение модуля упругости при растяжении. Установили его среднее значение E = 80000 МПа, которое приняли для дальнейших испытаний.

На рис. 7 и в таблице 3 показаны результаты влияния процентного содержания волокон на прочность при испытаниях на разрыв.

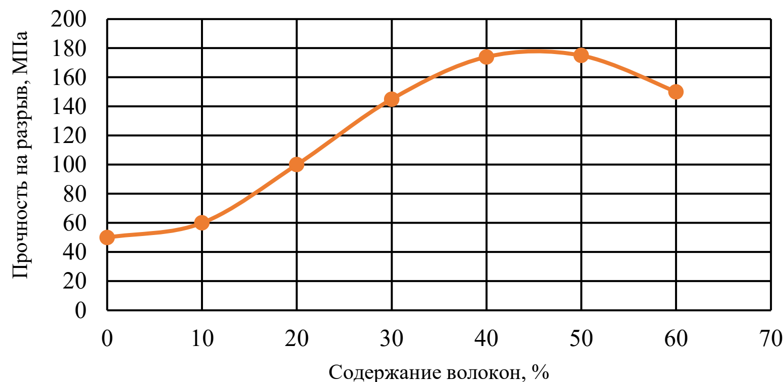


Рис. 7. Влияние процентного содержания волокон на прочность образцов при испытаниях на разрыв

Снижение значения прочности на разрыв при содержании волокон 60 % связано с тем, что полиэстера становится недостаточно для связывания такой массы волокон. Следовательно, силы сцепления между основным и армирующим материалами уменьшаются.

Таблица 3

Значения прочности на разрыв в зависимости от процентного содержания волокон для каждого образца

Содержание волокон в образце, %	Значения прочности на разрыв, МПа
0	50
10	63,3
20	101,5
30	145,7
40	174,3
50	175,4
60	150,2

Из рис. 8 и таблицы 4 видно, как содержание стекловолокна влияет на упругую деформацию образцов. Следует отметить, что с увеличением содержания волокон показатель упругой деформации возрастает и достигает максимального значения (2,71 %) при 50 %. С дальнейшим ростом массы волокон упругая деформация уменьшается, что связано с высокой прочностью стекловолокна на разрыв.

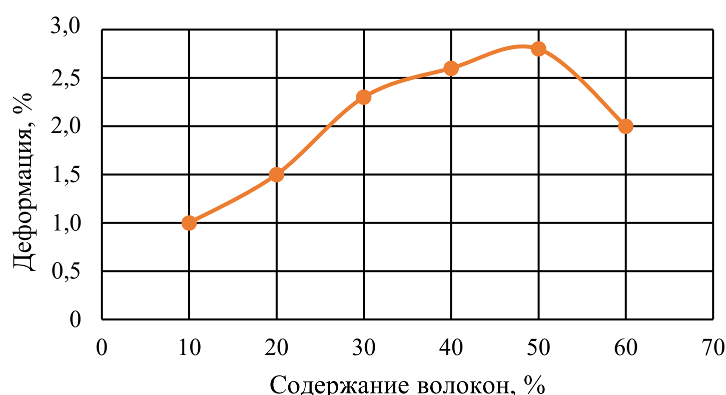


Рис. 8. Влияние содержания волокон на упругую деформацию

Таблица 4

Влияние содержания волокон в образцах на упругую деформацию

Содержание волокон в образцах, %	Значения упругой деформации, %
10	1,04
20	1,30
30	2,32
40	2,60
50	2,71
60	2,10

Испытания на ударопрочность. В опытах задействовали устройство Шарпи в соответствии с ISO 179[3]. Использовались образцы с размерами (80×10×4 мм) аналогичные тем, что показаны на рис. 9:

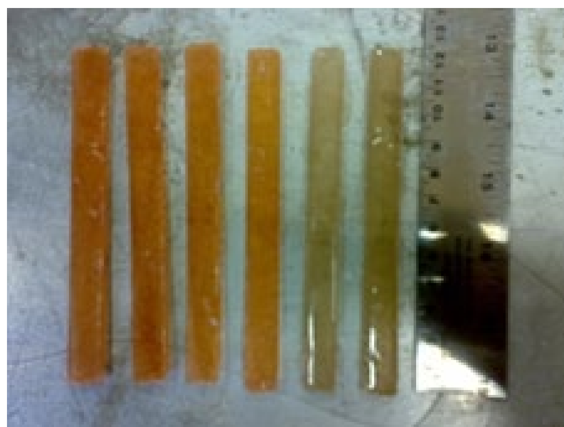


Рис. 9. Образцы для испытаний ударопрочности

Прочность рассчитывалась делением значения затраченной энергии на площадь сечения образца:

$$R = \frac{E}{A},$$

где R — ударопрочность, Дж /мм^2; E — затраченная энергия, Дж; A — площадь поперечного сечения образца мм^2.

На рис. 10 и в таблице 5 показано, как содержание волокон влияет на ударопрочность.

[3] ISO 179-1:2010. Пластмассы. Определение ударной прочности по Шарпи. Часть 1. Неинструментальный метод испытания на удар. URL: https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4569214 (дата обращения: 27.09.2023).

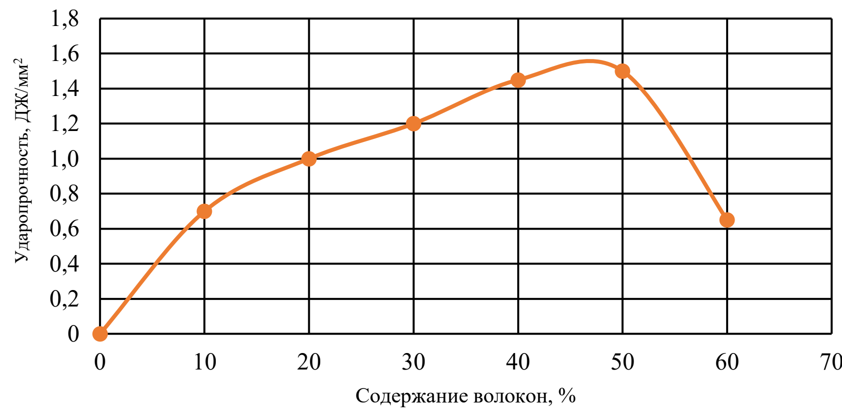


Рис. 10. Влияние содержания волокон на ударопрочность

Ударопрочность увеличивается с повышением содержания волокон до 50 %. Это объясняется ростом силы сцепления в результате насыщения волокон полиэстером в композиционном материале. Если же вес волокон превышает 50 %, ударопрочность снижается. Это обусловлено хрупкостью стекла [7, 13].

Таблица 5

Влияние содержания волокон на ударопрочность

Содержание волокон в образцах, %	Значения ударопрочности, Дж/мм^2
10	0,75
20	1,27
30	1,37
40	1,45
50	1,56
60	0,70

Испытания на твердость. Твердость образцов проверялась на твердомере, а число Виккерса рассчитывалось по соотношению:

$$HV = 1{,}854\frac{P}{D^2},$$

где: P — приложенная нагрузка, кН; D — диаметр удара, мм.

Испытания показали рост твердости при увеличении содержания стекловолокна до 50 % (рис. 11 и таблица 6).

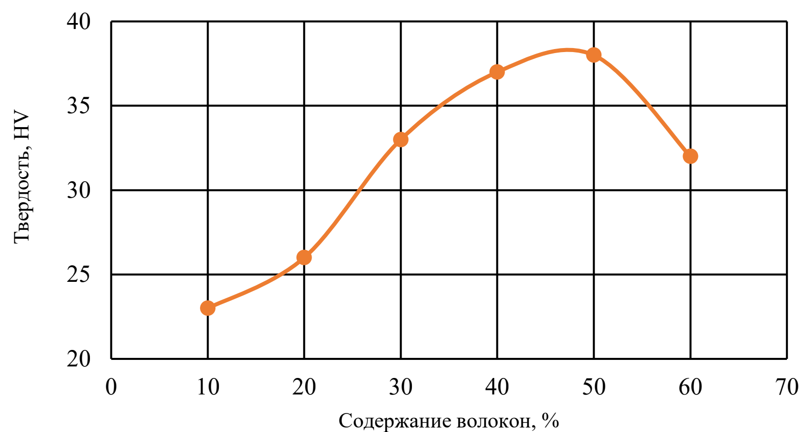


Рис. 11. Влияние содержания стекловолокна на твердость

Таблица 6

Влияние процентного содержания волокна на значения твердости

Содержание стекловолокна в образцах, %	Значения твердости, HV
10	23,0
20	26,0
30	33,0
40	37,2
50	38,0
60	32,0

При увеличении процентного содержания стекловолокна до 50 % усиливается твердость композита. Волокна и полимерные цепи соединяются в случайном порядке. В результате усиливается сопротивление композита проникновению, то есть твердость [7, 13]. Если же содержание волокон превышает 50 %, твердость сокращается из-за диспропорции волокон и полиэстера (его в этом случае недостаточно для завершения соединения армирующего и основного материалов).

Отметим также, что в процессе исследования доказана неточность выводов в работе [14]. Рассматривались полиэстерные композиты с массой армирующего Е-стекловолокна 15 %, 30 %, 45 % и 60 %. Исследовалось влияние содержания стекловолокна на такие механические свойства, как прочность на разрыв и изгиб, ударная вязкость. Твердость композитов оценивалась при помощи твердомера Бринелля. Результаты показали значительное улучшение механических свойств композита с увеличением массы стекловолокна, особенно при показателе 60 %. Однако авторы использовали слишком большой диапазон содержания стекловолокна в композите, что осложняет оценку точности полученных результатов. Кроме того, не учитывались процессы разрушения волокон, не проверялись их свойства.

Испытание стального образца. В соответствии со стандартом ASTM[4] образцы изготовили из листовой стали А36. Испытания на растяжение, удар и твердость проводились так же, как для образцов из полиэстера, армированных стекловолокном.

В таблице 7 приводятся результаты механических испытаний стальных образцов и их сравнение с образцами из композитного материала со стекловолокном 50 % (такой состав композита показал лучшие результаты).

Таблица 7

Сравнение результатов механических испытаний стальных образцов и образцов из композиционного материала с содержанием стекловолокна 50 %

Механические испытания	Образцы из стали марки А36	Образцы из композиционных материалов с содержанием стекловолокна 50 %
Прочность на разрыв, МПа	400	175,4
Ударопрочность, Дж/мм^2	0,61	1,56
Упругая деформация, %	0,11	2,71
Твердость, HV	135,5	38

Обсуждение и заключение. Итак, прочность на разрыв полиэстерного композита существенно возрастает с увеличением массы стекловолокна и достигает максимального значения 175,4 МПа при содержании армирующего материала 50 %. Незначительное содержание волокон (они постепенно разрушаются) обусловливает слабость композита.

Механические характеристики материала из 50 % полиэстера и 50 % стекловолокна лучше, чем у стали (кроме прочности на разрыв). Это позволяет использовать композит для производства лодок, т. к. в этом случае прочность на разрыв не основная характеристика [15]. Лодки, изготовленные из ненасыщенного полиэстера, армированного стекловолокном, на 75 % легче стальных. Сталь не устойчива к коррозии, что делает лодки из композиционного материала более долговечными.

[4] ASTM (American society for testing and materials). Англ. Американское общество испытаний и материалов. Название комплекса стандартов и организации в США, издающей нормативы для использования в различных отраслях производства. Стандарты ASTM регламентируют химический состав, механические, физические и электрические свойства материалов, виды обработки, способы изготовления, методы испытаний и тестирований, а также требования к металлопрокату. URL: https://almet.ru/directory/standards/astm.html (дата обращения: 27.09.2023).

Экспериментально установлено ухудшение качества композита, если содержание армирующих волокон превышает 50 %. Указаны две основные причины такого явления. Первая: при чрезмерной массе стекла его хрупкость передается всему материалу. Вторая: при непропорционально большом объеме волокон смолы недостаточно для их скрепления, что негативно сказывается на прочности.

Список литературы

1. Kumar S.N., Kumar V.G., Kumar V.C., Prabhu M. Experimental Investigation on Mechanical Behavior of E-Glass and S-Glass Fiber Reinforced with Polyester Resin. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*. 2018;5(5):19–26. https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V5I5P104

2. Bhowmick A.K. Mechanical Properties of Polymers*. Material Sciences & Engineering*. 2016;1:453–461. URL: https://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-36-01-03.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

3. Hinton M.J., Soden P.D., Kaddour A.S. (eds) *Failure Criterion Fibre-Reinforced-Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2004. 1269 p.

4. Ravi Jain, Luke Lee. (eds) *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability*. New York, NY: Springer; 2012. 280 p. http://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3

5. Meijer H.E., Govaert L.E. Mechanical Performance of Polymer Systems: The Relation between Structure and Properties. *Progress in Polymer Science.* 2005;30(8–9);915–938. http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.06.009

6. Lewin M. (ed) *Handbook of Fiber Chemistry. International Fiber Science and Technology Series,* 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2006. 1056 p. https://doi.org/10.1201/9781420015270

7. Varga Cs., Miskolczi N., Bartha L., Lipóczi G. Improving the Mechanical Properties of Glass-Fibre-Reinforced Polyester Composites by Modification of Fibre Surface. *Materials and Design.* 2010;31(1):185–193. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.034

8. Agarwel A., Garg S., Rakesh P.K., Singh I., Mishra B.K. Tensile Behaviour of Glass Fiber Reinforced Plastics Subjected to Different Environmental Conditions. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences.* 2010;17(6):471–476. URL: https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/10873/1/IJEMS%2017%286%29%20471-476.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

9. Estabraq T. Abdullah. A Study of Bending Properties of Unsaturated Polyester/Glass Fiber Reinforced Composites. *Al-Nahrain Journal of Science.* 2013;16(3):129–132. http://doi.org/10.22401/JNUS.16.3.18

10. Gornet L. *Généralités sur les matériaux composites*. Nantes, France: ECN; 2008. 51 p. URL: https://cel.hal.science/file/index/docid/470296/filename/MatComposites.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

11. Noorshashillawati Azura Binti Mohammad. *Characterization and Properties of the New Unsaturated Polyester Resins for Composite Application.* Gelugor, MYS: School of Industrial Technology; 2007. 125 p. URL: https://core.ac.uk/reader/32600400 (дата обращения: 06.09.2023).

12. Yilmaz H. Tensile Strength Testing of Thin Spray-on Liner Products (TSLs) and Shotcrete. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2010;110(10):559–569. URL: http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n10/01.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

13. Aramide F.O., Atanda P.O., Olorunniwo O.O. Mechanical Properties of a Polyester Fibre Glass Composite. *International Journal of Composite Materials.* 2012;2(6):147–151. https://doi.org./10.5923/j.cmaterials.20120206.06

14. El-Wazerya M.S., El-Elamy M.I., Zoalfakar S.H. Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Applied Science and Engineering.* 2017;14(3):121–131. https://doi.org/10.6703/IJASE.2017.14(3).121

15. Shenoi R.A., Dulieu-Barton J., Quinn S. Composite Materials for Marine Applications: Key Challenges for the Future. In book: Nicolais L., Meo M., Milella E. (eds) *Composite Materials.* London: Springer; 2011. С. 69–89. http://doi.org/10.1007/978-0-85729-166-0_3

References

1. Kumar SN, Kumar VG, Kumar VC, Prabhu M. Experimental Investigation on Mechanical Behavior of E-Glass and S-Glass Fiber Reinforced with Polyester Resin. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*. 2018;5(5):19–26. https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V5I5P104

2. Bhowmick AK. Mechanical Properties of Polymers*. Material Sciences & Engineering*. 2016;1:453–461. URL: https://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-36-01-03.pdf (accessed: 06.09.2023).

3. Hinton MJ, Soden PD, Kaddour AS. (eds) *Failure Criterion Fibre-Reinforced-Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2004. 1269 p.

4. Ravi Jain, Luke Lee. (eds) *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability*. New York, NY: Springer; 2012. 280 p. http://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3

5. Meijer HE, Govaert LE. Mechanical Performance of Polymer Systems: The Relation between Structure and Properties. *Progress in Polymer Science*. 2005;30(8–9);915–938. http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.06.009

6. Lewin M (ed). *Handbook of Fiber Chemistry. International Fiber Science and Technology Series,* 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2006. 1056 p. https://doi.org/10.1201/9781420015270

7. Varga Cs, Miskolczi N, Bartha L, Lipóczi G. Improving the Mechanical Properties of Glass-Fibre-Reinforced Polyester Composites by Modification of Fibre Surface. *Materials and Design*. 2010;31(1):185–193. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.034

8. Agarwel A, Garg S, Rakesh PK, Singh I, Mishra BK. Tensile Behaviour of Glass Fiber Reinforced Plastics Subjected to Different Environmental Conditions. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2010;17(6):471–476. URL: https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/10873/1/IJEMS%2017%286%29%20471-476.pdf (accessed: 06.09.2023).

9. Estabraq T Abdullah. A Study of Bending Properties of Unsaturated Polyester/Glass Fiber Reinforced Composites. *Al-Nahrain Journal of Science*. 2013;16(3):129–132. http://doi.org/10.22401/JNUS.16.3.18

10. Gornet L. *Généralités sur les matériaux composites*. Nantes, France: ECN; 2008. 51 p. URL: https://cel.hal.science/file/index/docid/470296/filename/MatComposites.pdf (accessed: 06.09.2023).

11. Noorshashillawati Azura Binti Mohammad. *Characterization and Properties of the New Unsaturated Polyester Resins for Composite Application*. Gelugor, MYS: School of Industrial Technology; 2007. 125 p. URL: https://core.ac.uk/reader/32600400 (accessed: 06.09.2023).

12. Yilmaz H. Tensile Strength Testing of Thin Spray-on Liner Products (TSLs) and Shotcrete. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2010;110(10):559–569. URL: http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n10/01.pdf (accessed: 06.09.2023).

13. Aramide FO, Atanda PO, Olorunniwo OO. Mechanical Properties of a Polyester Fibre Glass Composite. *International Journal of Composite Materials*. 2012;2(6):147–151. https://doi.org./10.5923/j.cmaterials.20120206.06

14. El-Wazerya MS, El-Elamy MI, Zoalfakar SH. Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Applied Science and Engineering*. 2017;14(3):121–131. https://doi.org/10.6703/IJASE.2017.14(3).121

15. Shenoi RA, Dulieu-Barton J, Quinn S. Composite Materials for Marine Applications: Key Challenges for the Future. In book: Nicolais L, Meo M, Milella E. (eds) *Composite Materials*. London: Springer; 2011. C. 69–89. http://doi.org/10.1007/978-0-85729-166-0_3

Поступила в редакцию 29.09.2023
Поступила после рецензирования 31.10.2023
Принята к публикации 22.11.2023

Об авторе:

Имад Ризакалла Антибас, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 7371-0223, ScopusID, ResearchID, ORCID, imad.antypas@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Received 29.09.2023
Revised 31.10.2023
Accepted 22.11.2023

About the Author:

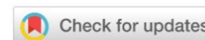
Imad Rizakalla Antipas, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Fundamentals of Machinery Design Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 7371-0223, ScopusID, ResearchID, ORCID, imad.antypas@mail.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 004.942, 004.02, 519.622, 544.3, 544.2
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-398-409

Научная статья

Автоматизация формирования математического описания кинетики для многостадийных химических реакций и численное решение прямой задачи



EDN: PDPGGO

Н.А. Лысенко[1] ✉, **К.Ф. Коледина**[1,2]
[1] Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация
[2] Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, г. Уфа, Российская Федерация
✉ nikitka_lysenko_2016@mail.ru

Аннотация

Введение. Основой для исследования, анализа и математической оптимизации любого химического процесса является адекватная математическая модель, учитывающая кинетику объекта. Кинетический анализ в химической технологии является важной задачей, поскольку позволяет оптимизировать процессы синтеза и прогнозировать их эффективность. Многие химические процессы включают в себя несколько стадийных реакций. Для успешного проектирования и оптимизации необходима математическая модель, которая описывает каждую стадию. Создание такой модели вручную может быть трудоемким и затратным процессом, требующим обработки большого объема информации. Современный уровень автоматизации позволяет ускорить получение математического описания кинетики многостадийных реакций. В этом случае значительно упрощается работа с данными и уменьшается вероятность совершения ошибок. Полученная математическая модель может быть применена для последующего анализа и оптимизации процесса. В работе рассмотрена промышленная реакция каталитического риформинга бензина, занимающая важное место в современной схеме переработки нефти, поскольку является источником высокооктановых компонентов товарных бензинов и индивидуальных ароматических углеводородов. Данный процесс характеризуется участием в нем большого числа (до 300) различных углеводородов, изменением числа молей и неизотермичностью. Математическое моделирование таких процессов предполагает детализацию стадий до необходимого уровня. Рассмотрена детализация до 173 стадий. В такой постановке задачи автоматизация формирования математического описания кинетики для каталитического риформинга бензинов ранее не проводилась. Поэтому целью представленной работы явилась реализация эффективных численных методов и алгоритмов для автоматизации формирования математической модели с учётом кинетики, термодинамики и изменения числа молей.

Материалы и методы. Математическое описание кинетики многостадийных реакций разрабатывается на основе закона действующих масс. Значения кинетических параметров взяты из литературных источников. Решение прямой задачи кинетики проводилось с применением следующих алгоритмов: метод Гира, Рунге-Кутты 4 порядка и метод scipy.odeint() языка Python. Концепция автоматизации реализована с помощью методологии IDEF0. Программное обеспечение написано на языке программирования Python.

Результаты исследования. Создано новое программное обеспечение для автоматизации процесса формирования математической модели с учетом кинетики, термодинамики и учета объема реакционной смеси. Приведены результаты работы программы на примере каталитического риформинга бензина. Реализована возможность учета в модели промежуточного подогрева смеси в каскаде реакторов. Получены численные значения изменения температуры, соответствующие промышленным данным.

Обсуждение и заключение. Результаты, полученные при моделировании химических превращений в каскаде реакторов каталитического риформинга бензина, подтвердили экзотермический характер реакции.

Разработанный программный продукт позволяет отобразить изменения концентраций веществ реакции, а также изменение температуры в реакторе и может быть использован в научных исследованиях организаций для анализа многостадийных каталитических процессов. Результаты моделирования кинетики реакции будут использоваться в последующей оптимизации условий проведения процесса на производстве.

Ключевые слова: кинетический анализ, математическое описание, автоматизация, система дифференциальных уравнений, прямая задача, методы численного решения

Благодарности. Авторы выражают признательность рецензентам за ценные замечания, способствовавшие повышению качества статьи.

Финансирование. Работа выполнена в рамках лидерского проекта «Разработка компьютерной системы анализа кинетики химических процессов и их многокритериальной оптимизации» Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Для цитирования. Лысенко Н.А., Коледина К.Ф. Автоматизация формирования математического описания кинетики для многостадийных химических реакций и численное решение прямой задачи. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):398–409. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-398-409

Original article

Automation of the Formation of a Mathematical Formulation of Kinetics for Multistage Chemical Reactions and Numerical Solution to a Direct Problem

Nikita A. Lysenko[1] ✉, **Kamila F. Koledina**[1,2]

[1] Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

[2] Institute of Petrochemistry and Catalysis, UFRC RAS, Ufa, Russian Federation

✉ nikitka_lysenko_2016@mail,ru

Abstract

Introduction. The basis for research, analysis and mathematical optimization of any chemical process is an adequate mathematical model that takes into account the kinetics of the object. Kinetic analysis is a challenge in chemical technology, since it allows for optimizing synthesis processes and predicting their efficiency. Numerous chemical processes involve several stage reactions. For successful design and optimization, a mathematical model that describes each stage is needed. Creating such a model manually can be time-consuming and costly, since it requires processing a large amount of information. The modern level of automation makes it possible to accelerate the obtaining of a mathematical formulation of the kinetics of multistage reactions. In this case, working with data is greatly simplified, and the probability of making mistakes is reduced. The resulting mathematical model can be applied for further analysis and optimization of the process. The paper considers the industrial reaction of catalytic reforming of gasoline, which occupies an important place in the modern scheme of oil refining, since it is a source of high-octane components of commercial gasolines and individual aromatic hydrocarbons. This process is characterized by the participation of a large number (up to 300) of various hydrocarbons, a change in the number of moles, and non-isothermality in it. Mathematical modeling of such processes involves detailing the stages to the required level. The detailing of up to 173 stages is considered. In this setting, automation of the formation of a mathematical formulation of kinetics for catalytic reforming of gasoline has not been carried out before. Therefore, the presented work aimed at implementing effective numerical methods and algorithms for automating the building of a mathematical model taking into account kinetics, thermodynamics, and changes in the number of moles.

Materials and Methods. The mathematical formulation of the kinetics of multistage reactions was developed on the basis of the mass action law. The kinetic parameters values were taken from literary sources. The direct kinetics problem was solved using algorithms: the Gear method, the Runge-Kutta method of the 4th order, and the scipy.odeint() method of the Python language. The automation concept was implemented using the IDEF0 methodology. The software was written in the Python programming language.

Results. A new software was created to automate the process of forming a mathematical model, taking into account the kinetics, thermodynamics, and the volume of the reaction mixture. The program results were presented by the example of catalytic reforming of gasoline. The model implemented the possibility of taking into account the intermediate heating of the mixture in the reactor cascade. Numerical values of temperature changes corresponding to industrial data were obtained.

Discussion and Conclusion. The results obtained through modeling chemical transformations in the cascade of gasoline catalytic reforming reactors confirmed the exothermic nature of the reaction. The developed software product provides displaying changes in the concentrations of reactants, as well as temperature variations in the reactor, and it can be used

in scientific research organizations for the analysis of multistage catalytic processes. The results of the reaction kinetics modeling will be used in the subsequent optimization of the process conditions in production.

Keywords: kinetic analysis, mathematical formulation, automation, differential equation system, direct problem, computational methods

Acknowledgements. The authors would like to thank the reviewers for valuable comments that contributed to the improvement of the article.

Funding information. The research was done within the framework of the leadership project "Development of a computer system for analyzing the kinetics of chemical processes and their multicriteria optimization", Ufa State Petroleum Technological University.

For citation. Lysenko NA, Koledina KF. Automation of the Formation of a Mathematical Formulation of Kinetics for Multistage Chemical Reactions and Numerical Solution to a Direct Problem. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):398–409. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-398-409

Введение. Изучение кинетики многоступенчатых химических процессов имеет теоретическое и практическое значение, поскольку позволяет раскрыть механизм реакций и осуществить контроль. При этом становится возможным ускорять целевые или замедлять побочные химические реакции. Кинетический анализ, будучи важной задачей химической технологии, способствует оптимизации процессов синтеза и прогнозированию их эффективности [1–3]. Многие химические процессы являются многостадийными реакциями. Для их эффективного проектирования и оптимизации необходимо иметь математическую модель, описывающую все стадии [4, 5]. Ручное формирование такой модели может быть очень трудоемким и затратным процессом, так как подразумевает под собой обработку большого объема информации [6].

Объектом исследования является промышленный процесс каталитического риформинга бензина. Целевой продукт реакции — риформат — позволяет получать основную массу товарного бензина. Остальные составляющие являются продуктами изомеризации, каталитического крекинга и алкилирования. Большинство нефтеперерабатывающих заводов в России и мире используют установки каталитического риформинга [7, 8]. Каталитический риформинг бензина позволяет получать ароматические углеводороды (ксилол, толуол, бензол), которые затем могут быть использованы в нефтехимической отрасли [9, 10]. Однако для товарного бензина присутствие в продукте ароматических углеводородов ограничивается по экологическим критериям. Поэтому детализированная сложная кинетика, показывающая постадийное образование компонент, позволит управлять условиями процесса для контроля выхода продукта и ограничения содержания ароматических углеводородов. Процесс каталитического риформинга бензина проводится в реакторном блоке, состоящем из трех последовательных реакторов, между которыми установлены печи для нагрева смеси. Это является необходимостью, так как данная реакция — эндотермическая. При математическом описании реакторного блока необходимо, наряду с изменениями концентраций компонент от условного времени контакта катализатора и смеси реакции, учитывать изменение температуры и объема реакционной смеси.

Автоматизация моделирования таких сложных процессов позволяет значительно ускорить получение математического описания кинетики многостадийных реакций, снизить вероятность ошибок и упростить процесс работы с данными [11]. В целом автоматизация формирования математического описания для многостадийных химических реакций является важным инструментом для эффективного управления процессами в различных отраслях промышленности, а также для достижения более точной и эффективной реализации химических реакций в лаборатории.

Таким образом, целью исследования являлась разработка программного продукта, помогающего автоматизировать формирование математического описания многостадийных химических реакций с учётом кинетики, термодинамики и изменения объёма реакционной смеси, а также получение численного решения составленной математической модели.

Для достижения цели исследования в данной работе решались следующие задачи:

– разработка программного модуля формирования математического описания кинетики с использованием языка программирования Python;

– разработка программного модуля численного решения прямой задачи согласно составленному математическому описанию с использованием языка программирования Python;

– получение результатов работы программного продукта для реакции каталитического риформинга бензина.

Материалы и методы. Математически указанный процесс может быть описан системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений с начальными данными, которая и является математической

моделью. Учитывая, что каталитический риформинг бензина является неизотермической реакцией с изменением объема реакционной смеси, модель многоступенчатой химической кинетики может быть рассмотрена в следующем контексте:

$$\frac{dy_i}{d\tau} = \sum_{j=1}^{M} v_{ij} \times w_j, i = 1,...N; \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{d\tau} = \sum_{i=1}^{N} \frac{dy_i}{d\tau}; Q(0) = Q^0; \quad (2)$$

$$w_j = k_j \times \prod_{i=1}^{N} (\frac{y_i}{Q})^{|\alpha_{ij}|} - k_{-j} \times \prod_{i=1}^{N} (\frac{y_i}{Q})^{\beta_{ij}}. \quad (3)$$

$$k_j = k_j^0 \times \exp\left(-\frac{E_j^+}{RT}\right); \ k_{-j} = k_{-j}^0 \times \exp\left(-\frac{E_j^-}{RT}\right); \quad (4)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = -\frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{dy_i}{d\tau} \times \Delta H_i(T)}{\sum_{i=1}^{N} y_i \times C_{pi}(T)}; \quad T(0) = T^0; \quad (5)$$

$$H_i(T) = \Delta H_i(298) + \int_{298}^{T} C_{pi}(T)dT; \quad (6)$$

$$C_{pi}(T) = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^3; \quad (7)$$

с начальными условиями при $\tau = 0, y_i(0) = y_i^0, T = 763K, Q = 1.014; \tau \in [0, t^*]$ [11].

В данной формуле реакционной кинетики имеется ряд переменных и коэффициентов, которые определяют концентрацию реагентов, время контакта и скорость реакции. Конкретно Q и y_i (концентрации реагентов реакции) могут быть выражены в моль/л или в долях, а переменная τ, показывающая условное время контакта реакционной смеси с катализатором, в кг×мин/моль или кг катализатора. В формуле также задействованы показатели: количество стадий *M* (173 стадии) и количество веществ *N* (38 веществ), а также стехиометрическая матрица ν_{ij}. α_{ij} — это все отрицательные элементы матрицы ν_{ij} на пересечении *i*-ой строки и *j*-го столбца, а β_{ij} — все положительные элементы матрицы ν_{ij} на пересечении *i*-ой строки и *j*-го столбца. Скорость *j*-ой стадии реакции w_j может быть выражена в 1/мин или в моль/(кг×мин), а константы скоростей стадий k_j, k_{-j} — в 1/мин. Кроме этого, в формуле указаны предэкспоненциальные множители k_j^0, k_{-j}^0, выраженные в 1/мин, энергии активации прямой и обратной реакции E_j^+, E_j^-, выраженные в ккал/моль, газовая постоянная R и температура T, измеряемая в Кельвинах. Продолжительность реакции *t** определяется временем, которое требуется для её завершения в минутах, а энтальпия образования *i*-го компонента $\Delta H_i(T)$ измеряется в Дж/моль. Удельную теплоемкость $C_{pi}(T)$ *i*-го компонента, измеряемую в Дж/(моль×К), можно выразить через коэффициенты температурной зависимости теплоемкости данного компонента, которые обозначены буквами a_i, b_i, c_i, d_i [12]. *i* — порядковый номер вещества, участвующего в реакции.

При моделировании химических превращений каталитического риформинга бензина необходимо учитывать большое число индивидуальных углеводородов. Поэтому в работе применяются групповые компоненты в модели по выделению типов углеводородов и числу атомов углерода в структуре молекулы: A_l — ароматические углеводороды; ACP_l — пятичленные нафтены; ACH_l — шестичленные нафтены; iP_l — изомеры парафинов; nP_l — нормальные парафины. Здесь *l* — количество атомов углерода в структуре молекулы. В таблице 1 приведены усредненные значения коэффициентов температурной зависимости теплоемкости групповых компонент, которые будут применяться в расчетах.

Таблица 1

Коэффициенты температурной зависимости групповых компонент

l	Группа углеводородов	a_i	b_i	c_i	d_i
1	nP_1	34,942	–0,03996	0,19184	–0,153
2	nP_2	28,146	0,043447	0,18946	–0,1908
3	nP_3	28,277	0,116	0,19597	–0,2327
4	nP_4	20,56	0,2815	–0,013143	–0,09457
5	IP_4	6,772	0,34147	–0,10271	–0,03685
6	nP_5	26,671	0,32324	0,04282	–0,1664
7	iP_5	–0,881	0,47498	–0,24797	0,06751
8	nP_6	25,924	0,41927	–0,012491	–0,1592
9	iP_6	–7,123	0,58327	–0,30338	0,06802
10	nP_7	26,984	0,50387	–0,04748	–0,1684
11	iP_7	19,245	0,55072	–0,14055	–0,08248
12	nP_8	29,053	0,58016	–0,057103	–0,1955
13	iP_8	–3,367	0,75824	–0,38216	0,05736
14	nP_9	29,687	0,66821	–0,096492	–0,2001
15	iP_9	68,581	0,44754	0,31908	–0,5118
16	nP_{10}	31,78	0,74489	–0,10945	–0,2267
17	iP_{10}	–46,17	1,108	–0,70316	0,1787
18	nP_{11}	125,21	0,31401	0,79137	–0,9141
19	iP_{11}	–8,791	1,0548	–0,5778	0,1192
20	ACH_6	13,783	0,20742	0,53682	–0,6301
21	ACH_7	4,296	0,42716	0,21058	–0,3999
22	ACH_8	–51,866	0,78827	–0,35255	–0,006855
23	ACH_9	–120,89	1,2728	–1,0794	0,4035
24	ACH_{10}	90,421	0,23264	0,94595	–1,057
25	ACH_{11}	–65,48	1,1809	–0,68379	0,1458
26	ACP_6	–9,939	0,42528	0,012521	–0,1886
27	ACP_7	–28,514	0,58607	–0,094379	–0,1644
28	ACP_8	–69,713	0.92602	–0,62526	0,2049
29	ACP_9	–116,73	1,3097	–1,2439	0,5292
30	ACP_{10}	–67,341	1,0922	–0,704	0,1906
31	ACP_{11}	–68,23	1,187	–0,7575	0,2018
32	A_6	–31,368	0,4746	–0,31137	0,08524
33	A_7	–24,097	0,52187	–0,29827	0,06122
34	A_8	–17,36	0,5647	–0,26293	0,01122
35	A_9	–10,933	0,64349	–0,27829	–0,01443
36	A_{10}	–24,187	0,79716	–0,48265	0,1341
37	A_{11}	–26,717	0,91044	–0,53876	0,1203
38	H_2	29,07	–0,0836	0,1064	0,5752

Уравнения (1), (3) и (4) описывают изменения концентраций реагентов в процессе, а в системе (2) используются мольные доли для описания изменения мольного расхода смеси. В (5) рассматривается зависимость изменения температуры реакции от термодинамических характеристик веществ. В (6), (7) приведена зависимость для расчета энтальпии образования i-го компонента и удельной теплоемкости.

В данной модели прямая задача (решение системы дифференциальных уравнений) является как жесткой, так и нежесткой. Метод Гира, используемый для решения модели каталитического риформинга, основан на дифференцировании назад [13–15]. Для сравнения результатов и выявления оптимального метода использовались явный одношаговый метод численного интегрирования Рунге-Кутты четвертого порядка и явный метод численного интегрирования scipy.odeint() языка программирования Python.

Концепцию автоматизации формирования математического описания кинетики для многостадийных химических реакций и численного метода решений проиллюстрируем с помощью методологии IDEF0.

На рис. 1 представлена контекстная диаграмма процесса автоматизации формирования математического описания кинетики для многостадийных химических реакций и решения численным методом.

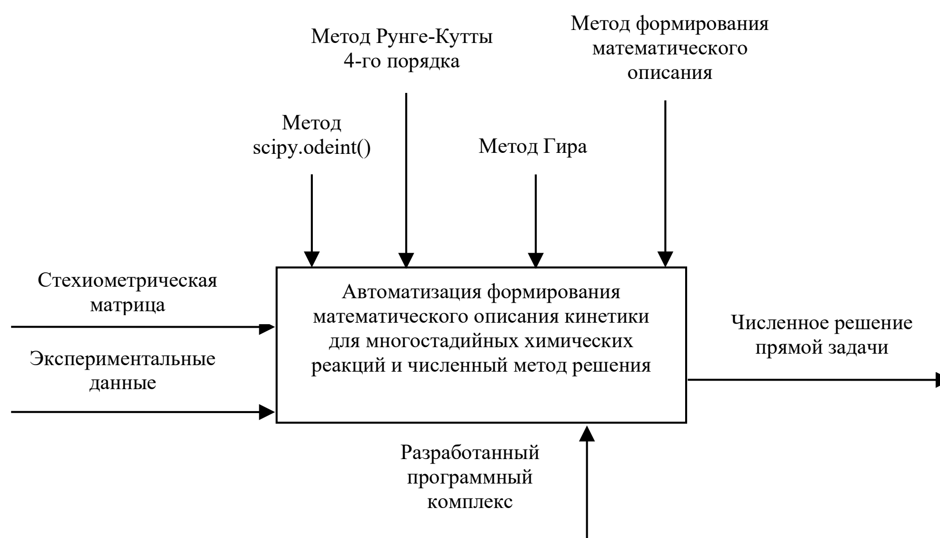


Рис. 1. Контекстная диаграмма «Автоматизация формирования математического описания кинетики для многостадийных химических реакций и численный метод решения»

Входные параметры — стехиометрическая матрица реакции и экспериментальные данные. В их число входят начальные данные по концентрации веществ, температуре, предэкспоненциальным множителям, энергиям активации. Результатом решения задачи является численное решение прямой задачи. В качестве элементов управления выступают численные методы для сравнения результатов, а также метод формирования математического описания (СОНДУ). В качестве механизма выступает разработанный программный комплекс автоматизации математического описания кинетики многостадийных реакций и решения прямой задачи. На рис. 2 приведена декомпозиция процесса автоматизации формирования математического описания кинетики для многостадийных химических реакций и решения численным методом на этапы:

– формирование математического описания;

– решение прямой задачи.

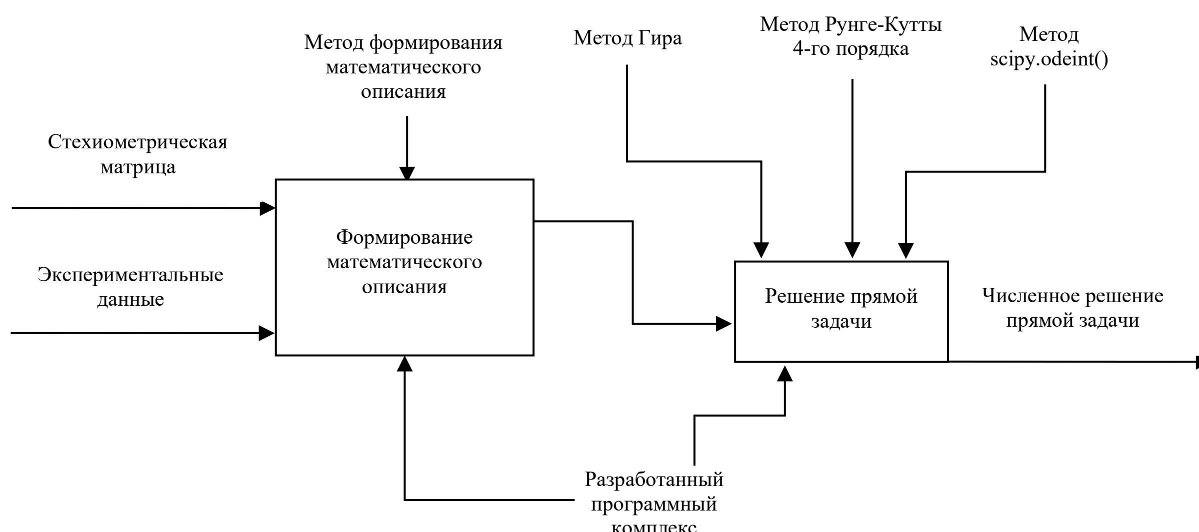


Рис. 2. Этапы решения задачи «Автоматизация формирования математического описания кинетики для многостадийных химических реакций и численный метод решения»

Возможности разработанного программного комплекса представлены описанными ниже особенностями.

При помощи программы можно создать кинетическую модель многостадийной химической реакции и представить её решение методами, описанными ранее, используя заданную стехиометрическую матрицу. Если реакция неизотермическая и происходит изменение объема реакционной смеси, к системе дифференциальных уравнений добавляются два дополнительных уравнения для описания этих изменений.

Математическая модель каталитического риформинга бензина представляет собой систему дифференциальных уравнений (СДУ) вида (1)–(7), состоящую из 40 дифференциальных уравнений по числу групповых компонент, температурной зависимости и уравнения изменения молей.

Основной функционал программы представляет собой:

– главное окно приложения с выводом математического описания по стехиометрической матрице, введенной пользователем;

– окно с визуализацией решения: для каждого численного метода (Python-odeint, Рунге-Кутта 4-го порядка, метод Гира) выводится время работы, массив времени *t* и решение системы дифференциальных уравнений в каждый момент времени, которое представляет собой графики изменения концентрации веществ, изменения температуры реакции или объёма реакционной смеси.

Результаты исследования. Реакция каталитического риформинга протекает в трех реакторах, между которыми располагается нагревательная печь. Начальная температура первого реактора равна 766 K (493 °C). Первые 9,6 условных часа реакция протекает в первом реакторе, температура падает. После этого происходит нагревание в печи между двух реакторов до 763 K (490 °C) и химический процесс переходит во второй реактор. Во втором реакторе процесс протекает в интервале времени от 9,6 до 32,3 условных часа, температура понижается. Прежде чем перейти к 3 реактору, смесь нагревается во второй промежуточной печи до 768 K (495 °C) и протекает в этом реакторе в интервале времени от 32,3 до 60 условных часа.

На рис. 3–5 изображены кинетические кривые групп углеводородов, участвующие в реакции и полученные с помощью метода Гира. Скачкообразные переходы на графиках свидетельствуют о том, что смесь переходит из одного реактора в другой с промежуточным нагревом.

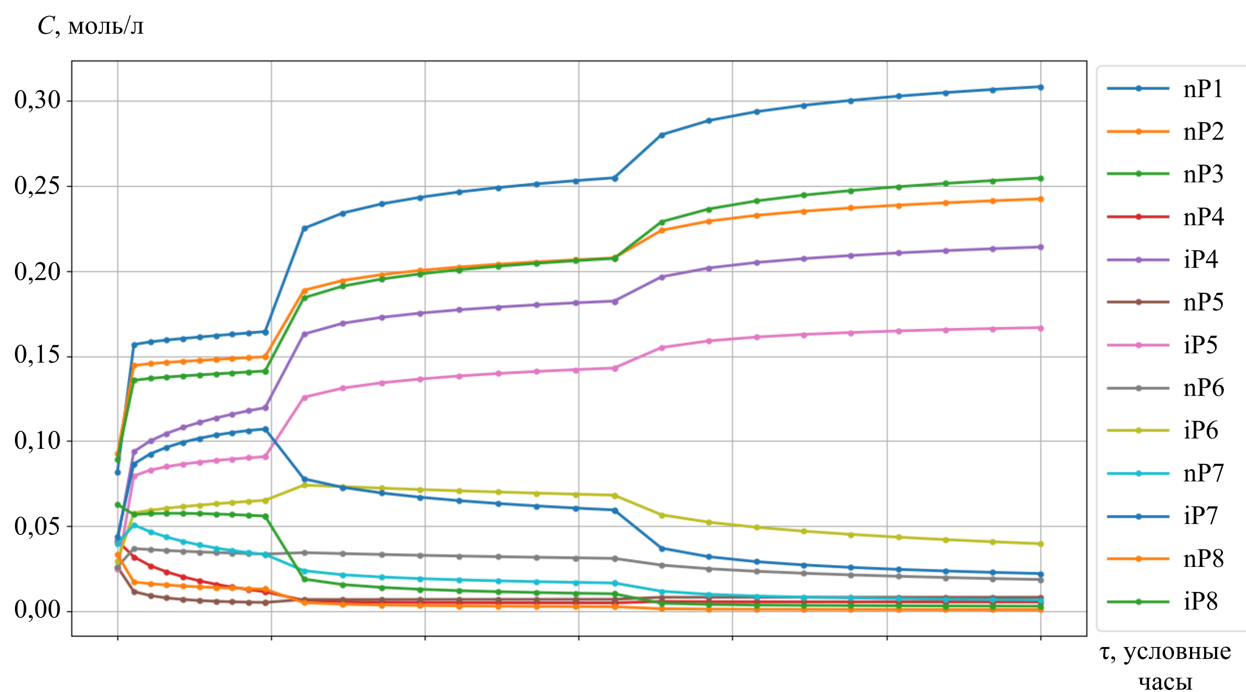


Рис. 3. Кинетические кривые каталитического риформинга бензина

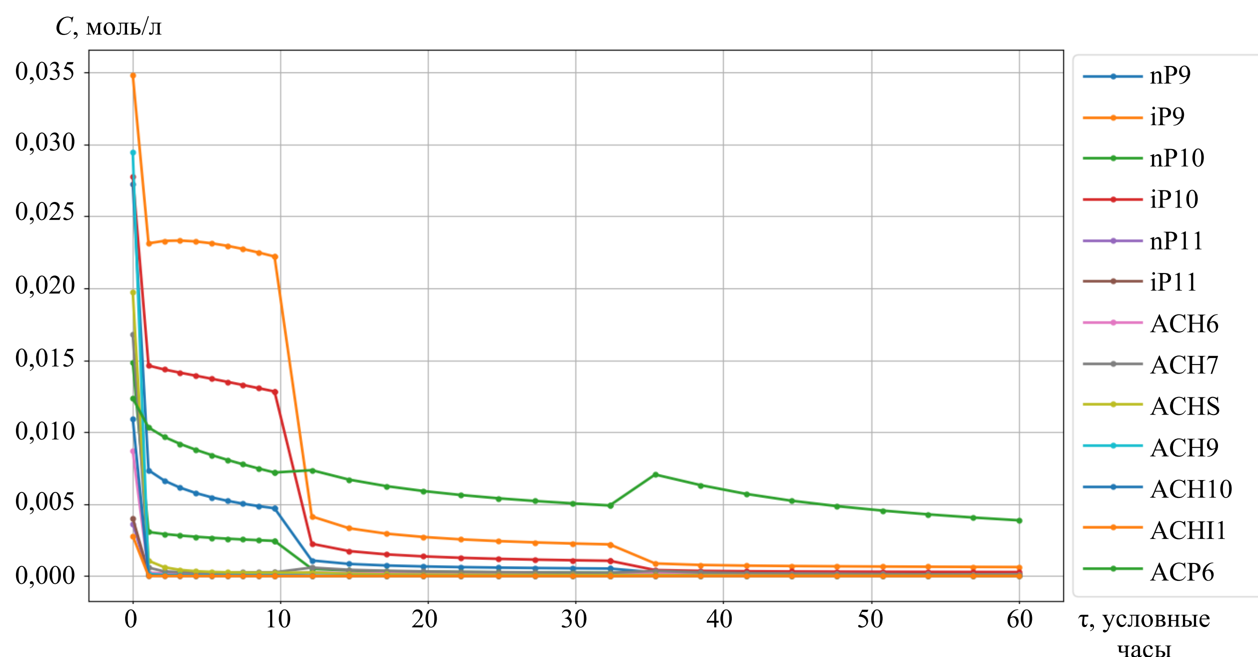


Рис. 4. Кинетические кривые каталитического риформинга бензина

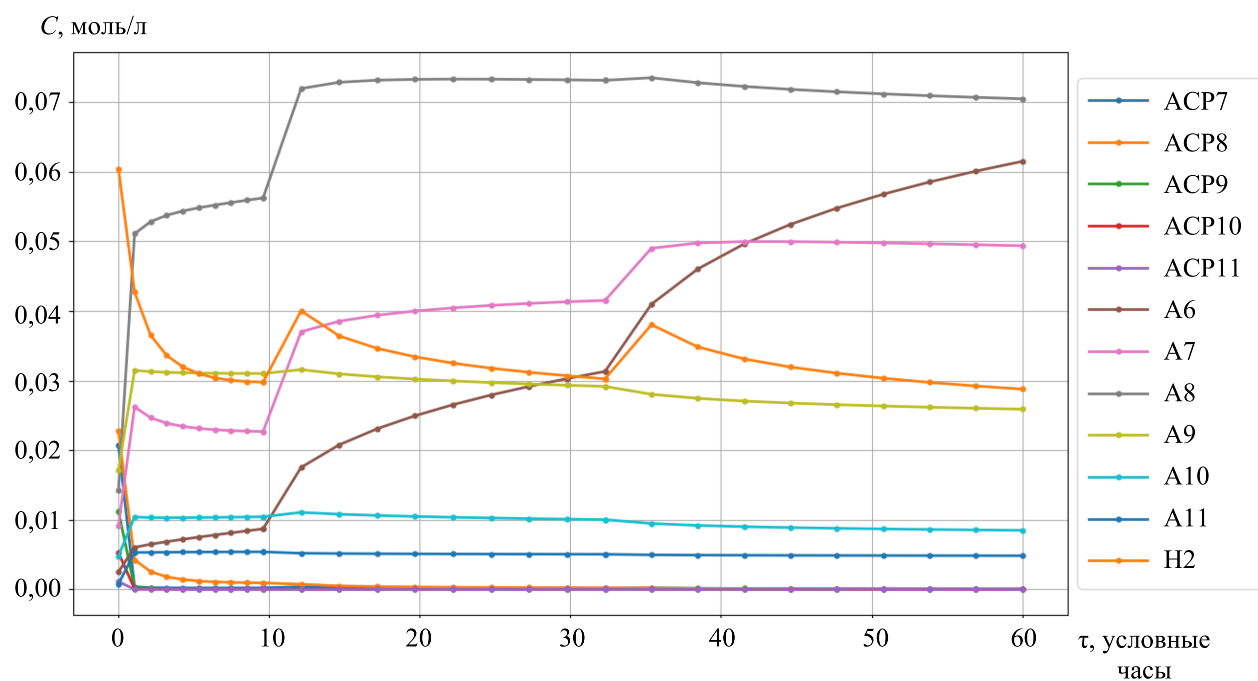


Рис. 5. Кинетические кривые каталитического риформинга бензина

Кривые изменения концентраций групповых компонент приведены в заисимости от времени контакта реакционной смеси с катализатором (рис. 3–5). Например, символ nP1 обозначает нормальный парафин с одним атомом углерода, а символ A9 — ароматический углеводород с девятью атомами углерода. На рис. 6 и 7 представлены соответственно кривые изменения температуры и объема реакционной смеси реакции каталитического риформинга бензина.

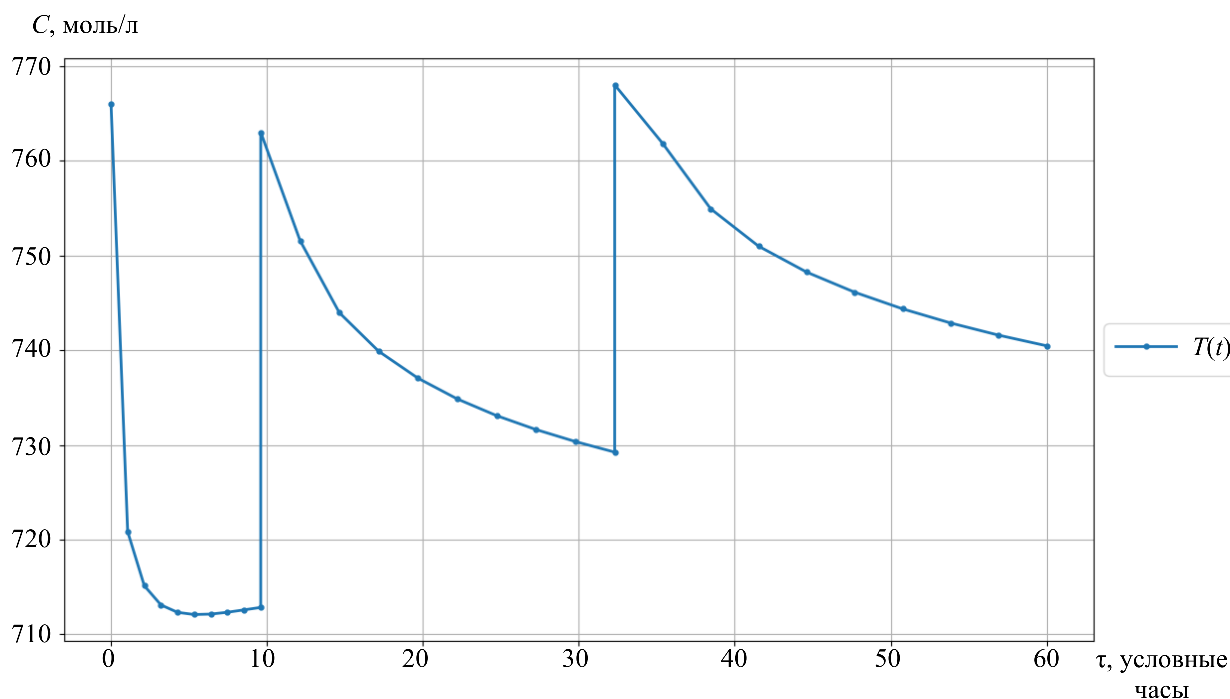


Рис. 6. Кривая изменения температуры

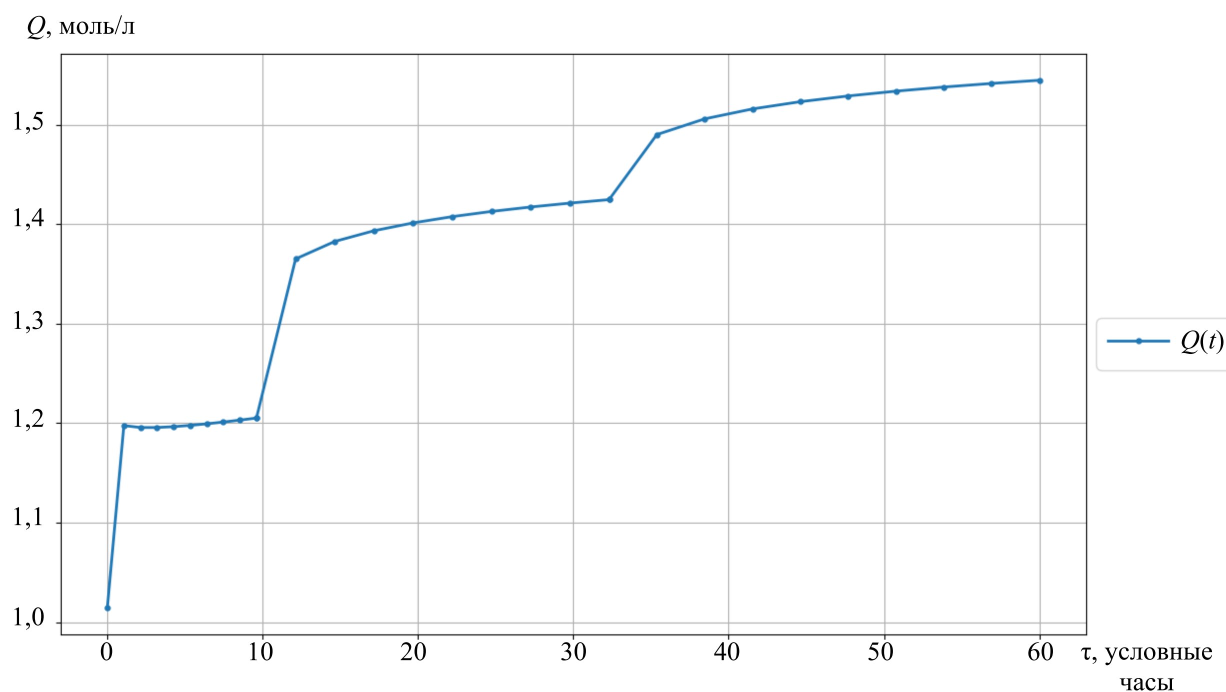


Рис. 7. Кривая изменения объема реакционной смеси

Обсуждение и заключение. В представленной работе разработан программный модуль формирования математического описания кинетики для сложных многостадийных реакций. Это позволяет анализировать сложные, в том числе промышленные процессы, рассматривать разные возможные механизмы за приемлемое время.

Разработанный программный модуль численного решения прямой кинетической задачи позволяет отслеживать динамическое изменение концентраций компонент и температуры процесса в случае его неизотермичности. Помимо представленных графиков изменения концентраций компонент, произведены замеры времени работы каждого из трех реализованных методов. По методу scipy.odeint() решение прямой задачи длилось 80,5 секунды, по методу Рунге-Кутты 4-го порядка — 111,8 секунд. Наиболее оптимальное

время, равное 39,8 секунды, показал метод Гира. Это подтверждает, что метод Гира оптимизирован для работы с жесткими системами дифференциальных уравнений.

Реализованный подход применен для моделирования промышленного процесса каталитического риформинга бензина. Автоматизация формирования математического описания кинетики и реализация численного решения прямой задачи позволили в приемлемые сроки разработать кинетическую модель детализированной схемы химических превращений и получить концентрационные и температурные профили в реакторах процесса, соответствующие промышленным данным.

Список литературы

1. Нарышкин Д.Г. Компьютерная математика в курсе "Физическая химия". *Современные информационные технологии и ИТ-образование.* 2012;(8):430–440. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternaya-matematika-v-kurse-fizicheskaya-himiya/viewer (дата обращения: 15.08.2023).
2. Qi Han, Xian-Tai Zhou, Xiao-Qi He, Hong-Bing Ji. Mechanism and Kinetics of the Aerobic Oxidation of Benzyl Alcohol to Benzaldehyde Catalyzed by Cobalt Porphyrin in a Membrane Microchannel Reactor. *Chemical Engineering Science*. 2021;245:116847. https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116847
3. Gheorghe Maria. A CCM-Based Modular and Hybrid Kinetic Model to Simulate the Tryptophan Synthesis in a Fed-Batch Bioreactor Using Modified *E. Coli* Cells. *Computers and Chemical Engineering*. 2021;153:107450. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107450
4. Файзуллин М.Р., Балаев А.В. Автоматизированная система исследования кинетики сложных химических реакций. *Вестник Башкирского университета*. 2008;13(3–1):835–839.
5. Хамидуллина З.А., Исмагилова А.С., Спивак С.И. Анализ информативности кинетических параметров сложных химических реакций. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: химия*. 2020;39(1):70–80. https://doi.org/10.26456/vtchem2020.1.9
6. Koledina K.F., Gubaydullin I.M., Koledin S.N. Mathematical Modeling and Computational Aspects of Multi-Criteria Optimization of the Conditions of a Laboratory Catalytic Reaction. *Numerical Analysis and Applications*. 2022;15:104–111. http://doi.org/10.1134/S1995423922020033
7. Zainullin R.Z., Koledina K.F., Akhmetov A.F., Gubaidullin I.M. Kinetics of the Catalytic Reforming of Gasoline. *Kinetics and Catalysis.* 2017;58(3):279–289. https://doi.org/10.1134/S0023158417030132
8. Зайнуллин Р.З., Коледина К.Ф., Ахметов А.Ф., Губайдуллин И.М. Возможные пути модернизации реакторного блока каталитического риформинга на основе кинетической модели. *Electronic Scientific Journal of Oil and Gas Business.* 2018;(6):78–97.
9. Brasseur G.P., Jacob D.J. *Modeling of Atmospheric Chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 606 p. https://doi.org/10.1017/9781316544754
10. Gubaydullin I., Koledina K., Sayfullina L. Mathematical Modeling of Induction Period of the Olefins Hydroalumination Reaction by Diisobutylaluminiumchloride Catalyzed with Cp_2ZrCl_2. *Engineering Journal*. 2014;18(1):13–24. https://doi.org/10.4186/ej.2014.18.1.13
11. Meshalkin V.P., Dovi V.G., Soboleva I.V. Method and Algorithm for Bayesian Estimation of Kinetic Parameters of Chemical Processes with Fluctuating Independent Variables. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2009;43(6):861–868. http://doi.org/10.1134/S0040579509060037
12. Сафиуллина Л.Ф., Коледина К.Ф., Губайдуллин И.М., Зайнуллин Р.З. Исследование математической модели каталитического риформинга бензина методами анализа чувствительности. *Вычислительные методы и программирование*. 2020;21(4):440–451. https://doi.org/10.26089/NumMet.v21r435
13. Murphy J.A. Physical Organic Chemistry. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*. 2010;(6):1025. https://doi.org/10.3762/bjoc.6.116
14. Zaynullin R.Z., Koledina K.F., Gubaydullin I.M., Akhmetov A.F., Koledin S.N. Kinetic Model of Catalytic Gasoline Reforming with Consideration for Changes in the Reaction Volume and Thermodynamic Parameters. *Kinetics and Catalysis*. 2020;61:613–622. https://doi.org/10.1134/S002315842004014X
15. Safiullina L.F., Gubaydullin I.M., Uzyanbaev R.M., Musina A.E. Computational Aspects of Simplification of Mathematical Models of Chemical Reaction Systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1368:042022. http://doi.org/10.1088/1742-6596/1368/4/042022

References

1. Naryshkin DG. Computer Mathematics in the Course "Physical Chemistry". *Modern Information Technologies and IT-Education.* 2012;(8):430–440. (In Russ.)

2. Qi Han, Xian-Tai Zhou, Xiao-Qi He, Hong-Bing Ji. Mechanism and Kinetics of the Aerobic Oxidation of Benzyl Alcohol to Benzaldehyde Catalyzed by Cobalt Porphyrin in a Membrane Microchannel Reactor. *Chemical Engineering Science*. 2021;245:116847. https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116847

3. Gheorghe Maria. A CCM-Based Modular and Hybrid Kinetic Model to Simulate the Tryptophan Synthesis in a Fed-Batch Bioreactor Using Modified *E. Coli* Cells. *Computers and Chemical Engineering*. 2021;153:107450. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107450

4. Fayzullin MR, Balaev AV. Computer-Aided System for Kinetic Studies of Complex Chemical Reactions. *Bulletin of BSU*. 2008;13(3-1):835–839.

5. Khamidullina ZA, Ismagilova AS, Spivak SI. Analysis Informativity of Kinetic Parameters of Complex Chemical Reactions. *Herald of TvSU. Series "Chemistry"*. 2020;39(1):70–80. https://doi.org/10.26456/vtchem2020.1.9

6. Koledina KF, Gubaydullin IM, Koledin SN. Mathematical Modeling and Computational Aspects of Multi-Criteria Optimization of the Conditions of a Laboratory Catalytic Reaction. *Numerical Analysis and Applications*. 2022;15:104–111. http://doi.org/10.1134/S1995423922020033

7. Zainullin RZ, Koledina KF, Akhmetov AF, Gubaidullin IM. Kinetics of the Catalytic Reforming of Gasoline. *Kinetics and Catalysis.* 2017;58(3):279–289. https://doi.org/10.1134/S0023158417030132

8. Zainullin RZ, Koledina KF, Akhmetov AF, Gubaidullin IM. Possible Ways of Upgrading Reactor Unit of Catalytic Reforming Based on Kinetic Model. *Electronic Scientific Journal of Oil and Gas Business.* 2018;(6):78–97.

9. Brasseur GP, Jacob DJ. *Modeling of Atmospheric Chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 606 p. https://doi.org/10.1017/9781316544754

10. Gubaydullin I, Koledina K, Sayfullina L. Mathematical Modeling of Induction Period of the Olefins Hydroalumination Reaction by Diisobutylaluminiumchloride Catalyzed with Cp_2ZrCl_2. *Engineering Journal*. 2014;18(1):13–24. https://doi.org/10.4186/ej.2014.18.1.13

11. Meshalkin VP, Dovi VG, Soboleva IV. Method and Algorithm for Bayesian Estimation of Kinetic Parameters of Chemical Processes with Fluctuating Independent Variables. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2009;43(6):861–868. http://doi.org/10.1134/S0040579509060037

12. Safiullina LF, Koledina KF, Gubaydullin IM, Zaynullin RZ. Study of a Mathematical Model of Gasoline Catalytic Reforming by Sensitivity Analysis Methods. *Numerical Methods and Programming*. 2020;21(4):440–451. https://doi.org/10.26089/NumMet.v21r435 (In Russ.)

13. Murphy JA. Physical Organic Chemistry. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*. 2010;(6):1025. https://doi.org/10.3762/bjoc.6.116

14. Zaynullin RZ, Koledina KF, Gubaydullin IM, Akhmetov AF, Koledin SN. Kinetic Model of Catalytic Gasoline Reforming with Consideration for Changes in the Reaction Volume and Thermodynamic Parameters. *Kinetics and Catalysis*. 2020;61:613–622. https://doi.org/10.1134/S002315842004014X

15. Safiullina LF, Gubaydullin IM, Uzyanbaev RM, Musina AE. Computational Aspects of Simplification of Mathematical Models of Chemical Reaction Systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1368:042022. http://doi.org/10.1088/1742-6596/1368/4/042022

Поступила в редакцию 07.10.2023
Поступила после рецензирования 02.11.2023
Принята к публикации 16.11.2023

Об авторах:

Никита Андреевич Лысенко, магистрант кафедры информационные технологии и прикладная математика Уфимского государственного нефтяного технического университета, (450064, РФ, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), SPIN-код: 5938-7991, ORCID, ResearcherID, nikitka_lysenko_2016@mail.ru

Камила Феликсовна Коледина, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационные технологии и прикладная математика Уфимского государственного нефтяного технического университета, (450064, РФ, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), старший научный сотрудник лаборатории математической химии Института нефтехимии и катализа УФИЦ РАН (450075, РФ, г. Уфа, проспект Октября, 141), SPIN-код: 2449-0255, ORCID, ResearcherID, ScopusID, koledinakamila@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.А. Лысенко — разработка программного обеспечения, подготовка текста, формулировка выводов.

К.Ф. Коледина — научное руководство, предоставление исходных данных, корректировка выводов, доработка текста статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 07.10.2023
Revised 02.11.2023
Accepted 15.11.2023

About the Authors:

Nikita A. Lysenko, undergraduate student of the Information Technology and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, RF), SPIN-code: 5938-7991, ORCID, ResearcherID, nikitka_lysenko_2016@mail.ru

Kamila F. Koledina, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Information Technology and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, RF), Senior Researcher, Laboratory of Mathematical Chemistry, Institute of Petrochemistry and Catalysis, UFRC RAS (141, pr. Oktyabrya, Ufa, 450075, RF), SPIN-code: 2449-0255, ORCID, ResearcherID, ScopusID, koledinakamila@mail.ru

Claimed contributorship:

NA Lysenko: software development, text preparation, formulation of conclusions.

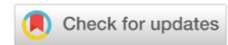
KF Koledina: academic advising, provision of initial data, correction of conclusions, revision of the text of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 004.58

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-410-421

Научная статья



EDN: QPFEMG

Оптимальная 2D-расстановка виртуальных объектов в физическом пространстве для приложений дополненной реальности

М.В. Алпатова ✉, **Ю.В. Рудяк**

Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ m.v.alpatova@yandex.ru

Аннотация

Введение. Научные и прикладные работы о размещении виртуальных объектов в реальном пространстве чаще всего фокусируются на вопросах интерактивности, интеграции реальности и виртуальности, физических свойствах виртуальных элементов. Однако недостаточно проработана задача одновременно свободного и оптимального размещения объектов с учетом их размеров и окружающей зоны комфортности вокруг них. В литературе можно найти описание схожей задачи — об упаковке в прямоугольный контейнер. В нашем случае цель не ограничивается максимально плотным размещением. Следует учесть два условия: жесткие размеры объектов (их запрещено нарушать) и дополнительные области — зоны комфортности (их нежелательно занимать). Цель работы — создание и реализация такого 2D-алгоритма размещения объектов в физическом пространстве, который будет учитывать обозначенные выше ограничения.

Материалы и методы. Используя аппарат численных методов, авторы задействовали созданный ранее 1D-алгоритм размещения объектов. Расчеты основываются на системе линейных уравнений. В одномерном случае оптимальное размещение виртуальных объектов сводится к задаче, не зависящей от вида функции комфортности. Элементы такой системы — размеры объектов, дистанции между ними, а также расстояния до края области встраивания, зоны комфортности. Предлагаемый 2D-алгоритм оптимальной расстановки виртуальных объектов реализовали в виде программного кода на языке C# с использованием известного игрового движка *Unity*. Решение тестировали на гаджетах в режиме пиковой нагрузки для 5, 10, 15, 20, 25, 35, 40, 45 и 50 объектов. Для опытов задействовали 1,8 тыс. устройств. Проанализировали около 77 тыс. событий. Чтобы исключить нерепрезентативные значения, каждый расчет повторяли 10 раз, и для каждого значения провели *z*-оценку. Аномальные (больше 3 и меньше –3) исключили.

Результаты исследования. В работе создан алгоритм 2D-расстановки, который реализует заполнение прямоугольной области виртуальными объектами. У каждого из них есть размер и еще одна характеристика — зона комфортности. Авторы составили блок-схему реализации данного алгоритма в заданной двумерной левосторонней системе координат. Показано, в частности, на каком этапе объекты сортируются по длине, когда формируются их партии и выполняются расстановки по двум осям. Первая — горизонтальная, вторая направлена вперед от пользователя (это вектор глубины, или фронтальное измерение). Алгоритм 1D-размещения для сформированного ряда позволяет оптимально расположить объекты вдоль оси *X* на основе рассчитанного коэффициента комфортности K. Выполнены расчеты и составлены схемы с целью достичь определенных показателей комфортности. Для каждого объекта первой линии смещение по оси *Z* от края плоскости определяется так, чтобы комфортность спереди равнялась комфортности по *X*. Начиная со 2-го ряда для вычисления отступа проверяется наличие потенциальных соседей, которые находятся на ряд выше и имеют общие участки по *X* с обрабатываемым объектом. Каждый элемент строки устанавливается по оси *Z* так, чтобы его комфортность сверху была максимальной из односторонних горизонтальных комфортностей в данной и предыдущей строках. Принцип расчета координаты *Z* для объекта строки представлен в виде блок-схемы.

Исходными данными для реализации этого алгоритма были 7 объектов с 14 разными размерами и 28 зонами комфортности. После программной реализации работу описанного 2D-алгоритма проверили на практике — в мобильном приложении дополненной реальности. Записали аналитические данные пользовательских сессий. Рассчитали среднее время выполнения. Возникшую в ходе работы гипотезу о квадратичной зависимости проверили на персональном компьютере. С этой целью провели аналогичный эксперимент для диапазона [10–10000] объектов. Гипотеза подтвердилась. Алгоритму можно присвоить сложность O(n^2). Для сравнения скорости вычисления задействовали 10 самых популярных моделей пользовательских устройств. Результаты представили в виде диаграммы. Минимальное зарегистрированное время выполнения — 0,093 мс, максимальное — 0,146 мс. Расчеты показали высокую эффективность двумерного алгоритма. Дополнительно визуализировали схемы расстановки для разного количества и параметров объектов.

Обсуждение и заключение. Предлагаемый алгоритм двумерного размещения позволяет работать с набором виртуальных объектов с разными размерами и зонами комфортности. Показаны достаточно высокие производительность и стабильность. В среднем алгоритм реализуется за доли миллисекунды даже при больших партиях объектов. Возможные будущие направления работы:

– расширение подхода для построения 3D моделей и алгоритмов;

– включение в алгоритм вращения объектов для большей гибкости их расположения и лучшего использования пространства.

Итоги работы могут представлять интерес для инженеров и дизайнеров интерфейсов. В перспективе следует изучить пользовательский опыт и возможности включения дополнительных ограничений на позиционирование.

Ключевые слова: виртуальные объекты в физическом пространстве, виртуальные объекты в дополненной реальности, комфортное размещение виртуальных объектов

Благодарности. Авторы выражают признательность редакционной команде журнала и рецензенту за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Финансирование. Исследование проводилось при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 21–510–07004.

Для цитирования. Алпатова М.В., Рудяк Ю.В. Оптимальная 2D-расстановка виртуальных объектов в физическом пространстве для приложений дополненной реальности. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(4):410–421. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-410-421

Original article

Optimal 2D Placement of Virtual Objects in Physical Space for Augmented Reality Applications

Marianna V. Alpatova ✉, **Yuri V. Rudyak**

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ m.v.alpatova@yandex.ru

Abstract

Introduction. Research and applied works on the placement of virtual objects in real space most often focus on issues of interactivity, integration of reality and virtuality, physical properties of virtual elements. However, the task of simultaneously free and optimal placement of objects, taking into account their size and the surrounding comfort zone, has not been sufficiently worked out. In the literature, you can find a description of a similar task — about packing in a rectangular container. In our case, the goal is not limited to the greatest possible dense placement. Two conditions should be taken into account: rigid dimensions of the objects (it is forbidden to violate them) and additional areas — comfort zones (it is undesirable to occupy them). The work aims at creating and implementing such a 2D algorithm for placing objects in physical space, which takes into account the above limitations.

Materials and Methods. Using a set of numerical methods, the authors applied the previously created 1D algorithm for the placement of objects. Calculations were based on a system of linear equations. In the one-dimensional case, the optimal placement of virtual objects was reduced to a task that did not depend on the type of comfort function. The elements of such a system were the dimensions of objects, the distances between them, as well as the distances to the edge of the embedding area, a comfort zone. The proposed 2D algorithm for optimal placement of virtual objects was implemented in the form of a program code in C# using the well-known *Unity* game engine. The solution was tested on gadgets in peak load mode for 5, 10, 15, 20, 25, 35, 40, 45, and 50 objects. 1.8 thousand devices were used for experiments. About 77

thousand events were analyzed. To exclude unrepresentative values, each calculation was repeated 10 times, and a *z*-score was performed for each value. Abnormal events (more than 3 and less than -3) were excluded.
Results. In this paper, a 2D placement algorithm that implements filling a rectangular area with virtual objects has been created. Each of the objects had a size and another characteristic — a comfort zone. The authors compiled a flowchart for the implementation of this algorithm in a given two-dimensional left-hand coordinate system. It was shown, in particular, at what stage objects were sorted by length, when their batches were formed, and arrangements were made along two axes. The first axis was horizontal, the second was directed forward from the user (this is the depth vector, or frontal measurement). The 1D-placement algorithm for the generated row provided optimal positioning the objects along *X*-axis based on the calculated comfort coefficient К. Calculations were made and schemes were drawn up to obtain certain comfort indicators. For each object of the first string, the displacement along *Z*-axis from the edge of the plane was determined so that the comfort in front was equal to the comfort along *X*. Starting from the 2nd row, to calculate the displacement, the presence of potential neighbors who were a row higher and had common areas along *X* with the object being processed, was checked. Each element of the string was set along *Z*-axis so that its comfort from above was the maximum of the one-sided horizontal comfort in this and the previous strings. The principle of calculating *Z* coordinate for a string object was presented in the form of a flowchart. The initial data for the implementation of this algorithm were 7 objects with 14 different sizes and 28 comfort zones. After the software implementation, the operation of the described 2D algorithm was tested in practice — in an augmented reality mobile application. Analytical data of user sessions was recorded. The average execution time was calculated. The hypothesis of quadratic dependence that arose during the work was tested on a personal computer. For this purpose, a similar experiment was conducted for a range of [10-10,000] objects. The hypothesis was confirmed. The algorithm can be assigned a complexity of O(n^2). To compare the calculation speed, 10 of the most popular models of user devices were utilized. The results were presented in the form of a diagram. The minimum registered execution time was 0.093 ms, the maximum — 0.146 ms. Calculations showed high efficiency of the two-dimensional algorithm. Additionally, the placement schemes for different numbers and parameters of objects were visualized.
Discussion and Conclusion. The proposed algorithm of two-dimensional placement enables the user to work with a set of virtual objects with different sizes and comfort zones. Sufficiently high performance and stability are shown. On average, the algorithm is implemented in fractions of a millisecond, even with large batches of objects. Possible future focus areas:
– expansion of the approach for building 3D models and algorithms;
– inclusion of objects in the rotation algorithm for greater flexibility of their location and better use of space.
The research results can be of interest to engineers and interface designers. In the future, it is required to study the user experience and the possibilities of including additional restrictions on positioning.

Keywords: virtual objects in physical space, virtual objects in augmented reality, comfortable placement of virtual objects

Acknowledgements. The authors appreciate the editorial team of the journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

Funding information. The research was done with the financial support from RFFI within the framework of scientific project No. 21–510–07004.

For citation. Alpatova MV, Rudyak YuV. Optimal 2D Placement of Virtual Objects in Physical Space for Augmented Reality Applications. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(4):410–421. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-410-421

Введение. Известная задача приложений дополненной реальности (augmented reality, AR) — размещение виртуальных объектов в реальном физическом пространстве. Ряд исследований [1–3] фокусируются на интерактивности, слиянии реальной и виртуальной сфер. Изучаются также вопросы физических свойств виртуальных объектов.

Недостаточно проработана задача такого размещения объектов, которое одновременно было бы свободным и оптимальным, учитывало не только геометрические размеры объектов, но и зоны комфортности вокруг них. В [6] отмечена внешняя схожесть этой задачи с известной задачей об упаковке в прямоугольный контейнер [5]. Однако есть существенная разница. В исследуемом случае недостаточно обеспечить максимально плотную упаковку. При размещении виртуальных объектов нужно учесть не только их жесткие размеры, которые нельзя нарушать, но и дополнительные области — зоны комфортности. Их занимать нежелательно. Эти дополнительные области позволяют приблизиться к объекту и выполнить с ним какие-то действия.

Целями представленной работы являются создание, реализация и оценка 2D-алгоритма оптимального размещения виртуальных объектов в физическом пространстве.

Материалы и методы. Ранее [4] авторы определили, что такое комфортное размещение виртуальных объектов, ввели понятие функции комфортности $k(x)$. Она монотонно возрастает от 0 до 1 при $0 \le x \le 1$ и равна 1 при $x > 1$, где $x = X/D$, X — расстояние от края объекта до ближайшего препятствия, D — размер зоны комфортности. Для каждого измерения у объекта есть две односторонние зоны комфортности $D-$ и $D+$. Комфортность с каждой стороны вычисляется отдельно.

В [6] показано, что задача одномерного размещения n виртуальных объектов в свободной области пространства протяженностью L сводится к системе линейных уравнений, не зависящих от вида функции комфортности k(x):

$$\begin{cases} \dfrac{X_-^{(1)}}{D_-^{(1)}} = \dfrac{X_-^{(2)}}{\tilde{D}_+^{(1)}}, \\ \dfrac{X_-^{(i)}}{\tilde{D}_-^{(i)}} = \dfrac{X_-^{(i+1)}}{\tilde{D}_+^{(i)}}, \\ \dfrac{X_-^{(n)}}{\tilde{D}_-^{(n)}} = \dfrac{L - \sum\limits_{i=1}^{n} \left(X_-^{(i)} + l^{(i)} \right)}{\tilde{D}_+^{(n)}}. \end{cases} \qquad (1)$$

Здесь $X_-^{(1)}$ — расстояние первого объекта от левого края области встраивания; $X_-^{(i)}$, $i = 2,3,...,n$ — расстояние между объектами с номерами i и $(i - 1)$; $D_-^{(i)}$ и $D_+^{(i)}$ — левая и правая зоны комфортности соответственно; $l^{(i)}$ — размер объекта; $\tilde{D}_+^{(i)} = \tilde{D}_-^{(i+1)} = D_+^{(i)} + D_-^{(i+1)}$, $i = 1,2,\ldots,(n - 1)$.

Матрица системы (1) сильно разрежена, поэтому можно избежать использования не самых быстрых универсальных методов и достаточно просто найти решение. Например, в первых $(n - 1)$ равенствах можно в каждом i-м уравнении выразить $X_-^{(i+1)}$ через $X_-^{(i)}$, затем подставить это в последнее уравнение и получить линейное уравнение относительно $X_-^{(1)}$. После этого от первого уравнения к $(n - 1)$-му последовательно определяются значения $X_-^{(2)}, X_-^{(3)}, ..., X_-^{(n)}$. Авторы реализовали данный 1D-алгоритм размещения объектов с помощью численных методов. Он показал высокую скорость и эффективность. Этот 1D-алгоритм стал основой для научных изысканий, описанных в представленной работе. Авторы предложили 2D-алгоритм оптимальной расстановки виртуальных объектов. Его реализовали в виде программного кода на языке C# с использованием игрового движка *Unity*, который широко используется для создания мобильных приложений дополненной реальности [8]. В ходе эксперимента на устройстве пользователя, работающего в режиме пиковой нагрузки, запускался алгоритм для 5, 10, 15, 20, 25, 35, 40, 45 и 50 объектов. Замеряли время, затраченное на вычисления (в миллисекундах). Каждый расчет повторяли 10 раз во избежание аномальных значений. Всего в эксперименте участвовали 1,8 тыс. устройств, с них собрали и проанализировали около 77 тыс. событий с результатами.

Фильтрация аномалий с помощью z-оценки позволила выявить значения, которые можно определить как выбросы [9]. Авторы стандартизировали данные и вычислили z-оценку для каждого значения. Аномальными сочли те, у которых z-оценка оказалась больше 3 или меньше –3. Их исключили и сосредоточились на типичных и репрезентативных данных.

Результаты исследования. Итак, на плоскости X, Z есть прямоугольная область с шириной L_x и длиной L_z. Ее следует заполнить некоторым количеством виртуальных объектов. Каждый объект помимо своих размеров $l_x^{(i)}$ и $l_z^{(i)}$ (где i — номер объекта) характеризуется еще зонами комфортности $D_{x-}^{(i)}, D_{x+}^{(i)}, D_{z-}^{(i)}, D_{z+}^{(i)}$. На рис. 1 представлена блок-схема описываемого алгоритма.

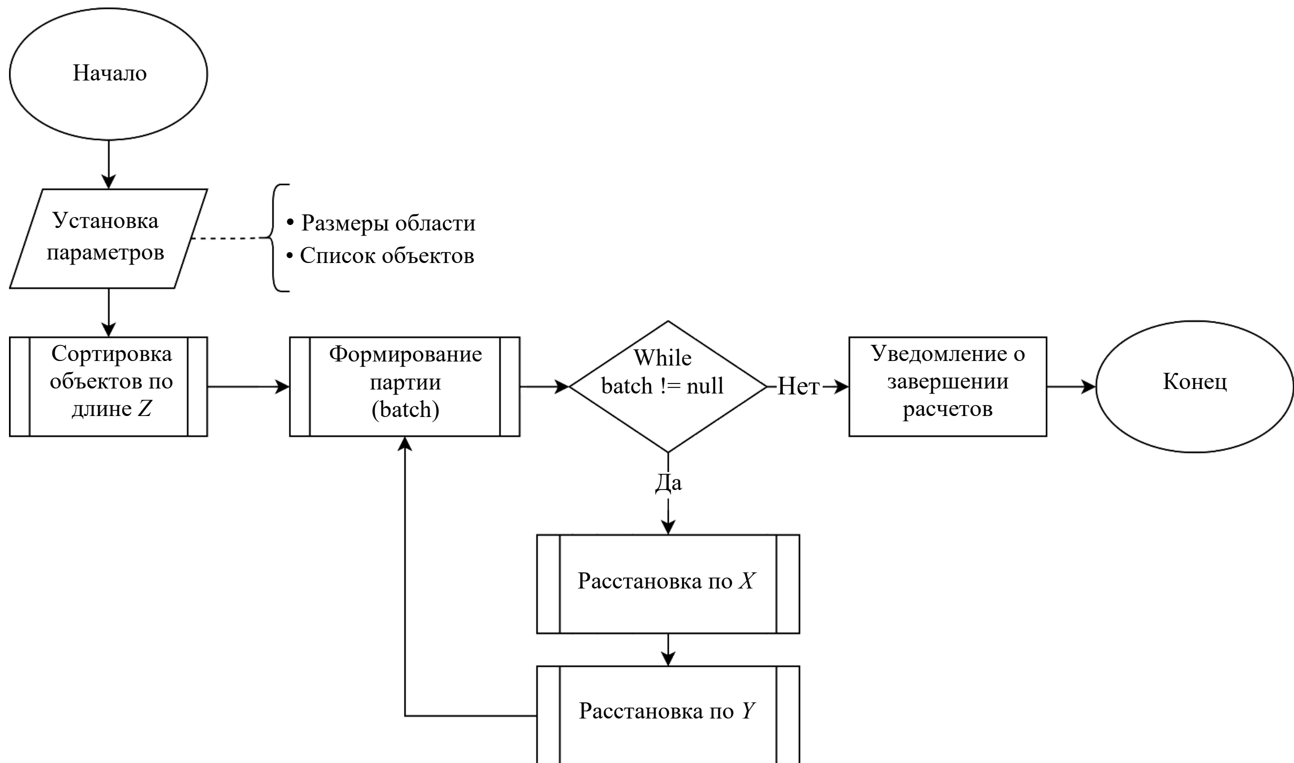


Рис. 1. Верхнеуровневый алгоритм 2D-расстановки

В данной работе используется левосторонняя система координат: ось X обозначает горизонтальный вектор размещения, ось Z направлена вперед от пользователя и является вектором глубины или фронтальным измерением [7]. Объекты размещаются в горизонтальной плоскости (например, на полу, столешнице и пр.), поэтому вертикальная ось Y не рассматривается, а все иллюстрации предполагают вид сверху на получившуюся композицию.

В левом нижнем углу каждого виртуального объекта обозначим опорную точку (pivot). Она будет определять конечные координаты размещения объекта. Далее набор объектов сортируется в порядке убывания по $l_z^{(i)} + D_{z-}^{(i)} + D_{z+}^{(i)}$ — габаритной длине объектов с учетом зон комфортности, расположенных спереди и сзади в соответствии с рассматриваемой осью координат. После сортировки объекты, занимающие больше пространства по глубине, располагаются дальше от пользователя (или выше для схемы, представленной в горизонтальной проекции). Блок-схема формирования партии из объектов представлена на рис. 2.

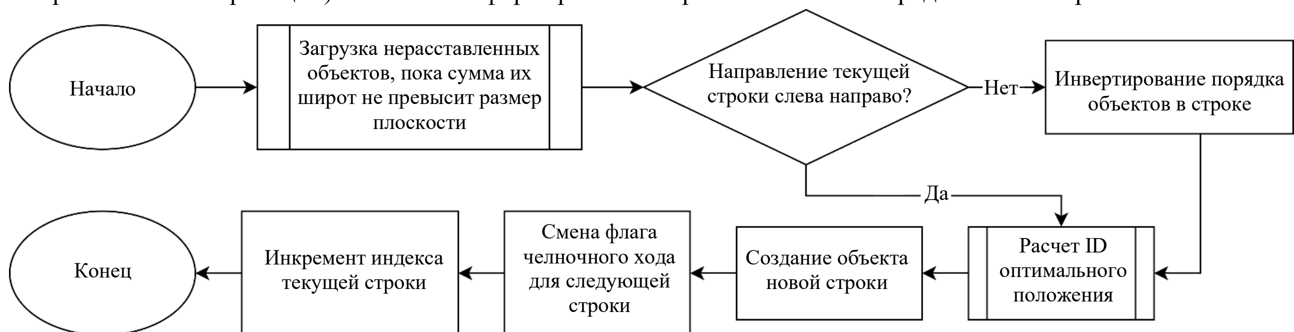


Рис. 2. Алгоритм формирования ряда из объектов

Затем из упорядоченного множества объектов формируются отдельные строки или партии (batch). В каждую строку включается минимальное количество объектов, сумма ширины которых вместе с зонами комфортности превосходит ширину заполняемой области L_x. Если при добавлении следующего объекта вычисленная занимаемая ширина превысит горизонтальный размер доступного пространства внутри прямоугольника, партия считается завершенной. Таким образом, каждая партия может быть размещена в виде линии в пределах области. Ряды чередуются слева направо и справа налево для смешивания крупных и мелких объектов. Это можно назвать «челночным ходом» (рис. 3).



Рис. 3. Схема «челночного хода» на координатной плоскости

Для сформированного ряда применяется алгоритм 1D-размещения, который позволяет оптимально расположить ряд объектов вдоль оси *X* на основе рассчитанного коэффициента комфортности *K*, одинакового для всех объектов ряда. Для каждого объекта первой линии смещение по оси *Z* от края плоскости определяется таким образом, чтобы комфортность спереди равнялась комфортности по *X*:

$$\frac{Z_{+}^{(1)}}{D_{z+}^{(1)}}=\frac{X_{-}^{(1)}}{D_{x-}^{(1)}},\frac{Z_{+}^{(i)}}{D_{z+}^{(i)}}=\frac{X_{-}^{(i)}}{\tilde{D}_{x-}^{(i)}},\ i=2,3,...,n\,. \tag{2}$$

Начиная со 2-го ряда для вычисления отступа Z_+ проверяется наличие потенциальных соседей сверху из вышележащего ряда, имеющих с текущим обрабатываемым объектом общие участки по координате *X*. При этом каждый объект размещаемой строки устанавливается по оси *Z* таким образом, чтобы его комфортность сверху была максимальной из односторонних горизонтальных комфортностей в данной и предыдущей строках. Алгоритм расчета координат *Z* представлен на рис. 4.

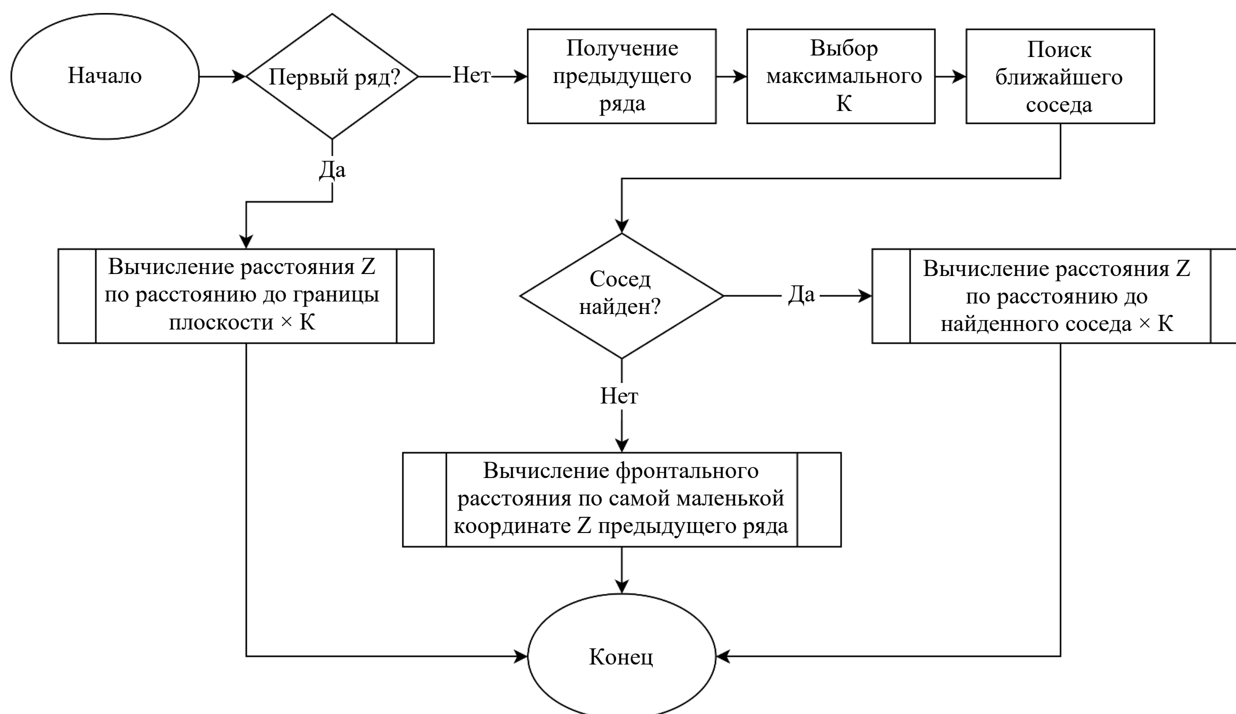


Рис. 4. Принцип расчета координаты *Z* для объекта строки

Из блок-схемы видно, что отступ вычисляется аналогично для всех трех возможных сценариев:

– отступ от края плоскости для установки объекта;

– отступ от соседа сверху;

– при отсутствии соседа в предыдущей строке берется самый близкий по *Z* объект из всех предыдущих строк.

Новые партии формируются до тех пор, пока всем объектам не присвоят ряд или пока не закончится физическое пространство.

Исходные данные к описанному алгоритму систематизированы в таблице 1. Объекты рассортированы по их вертикальным размерам.

Таблица 1

Исходные данные к примеру работы описанного алгоритма

Номер объекта	Размер	Зона комфортности
1	(7; 4)	(4; 3; 3; 5)
2	(10; 4)	(4; 3; 5; 3)
3	(5; 4)	(2; 3; 5,25; 2,25)
4	(12; 4)	(2,8; 3,3; 3,8; 4,65)
5	(5; 4)	(2,5; 4; 1,75; 5,8)
6	(18; 4)	(3,2; 2,4; 5; 2,25)
7	(11; 4)	(2,1; 2,45; 2; 14,2)

Таблица 1 соответствует рис. 5, демонстрирующему размещение объектов.

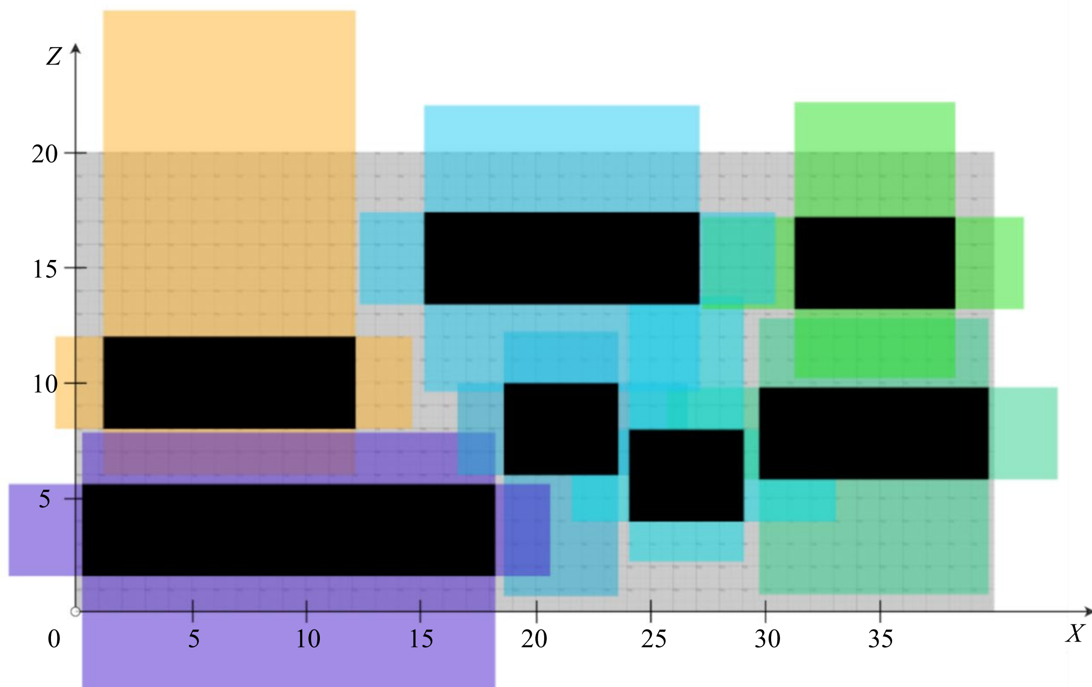


Рис. 5. Схема расположения объектов для рассматриваемого примера. Вид сверху

Серый прямоугольник — это свободная площадь, на которой расставляются объекты. Черные области — объекты в их габаритных размерах. Цветные, с наложениями, — предустановленные зоны комфортности для каждого объекта. Как отмечалось выше, зоны комфортности объектов могут частично перекрываться и выходить за пределы свободного пространства, но применяемый подход позволяет обеспечить баланс, чтобы в равной мере уменьшались комфортности различных объектов.

Напомним, что в данную модель входит понятие функции комфортности $k(x)$. От нее не зависит полученная система уравнений (1), а значит и оптимальное размещение объектов. А вот значения односторонних комфортностей объектов определяются и их размещением, и видом функции $k(x)$. Приведем два примера:

– в случае линейной функции $k(x)$ односторонние комфортности объектов верхнего ряда рис. 5 оказываются равными 0,6;

– для зависимости $\sqrt{1-(x-1)^2}$ — значение 0,9.

После программной реализации описанного 2D-алгоритма его внедрили в мобильное приложение с дополненной реальностью и записали аналитические данные пользовательских сессий. Сгруппировали информацию по каждой уникальной модели устройства, по каждому количеству расставляемых объектов в диапазоне [10–50]. Рассчитали среднее время выполнения (рис. 6).

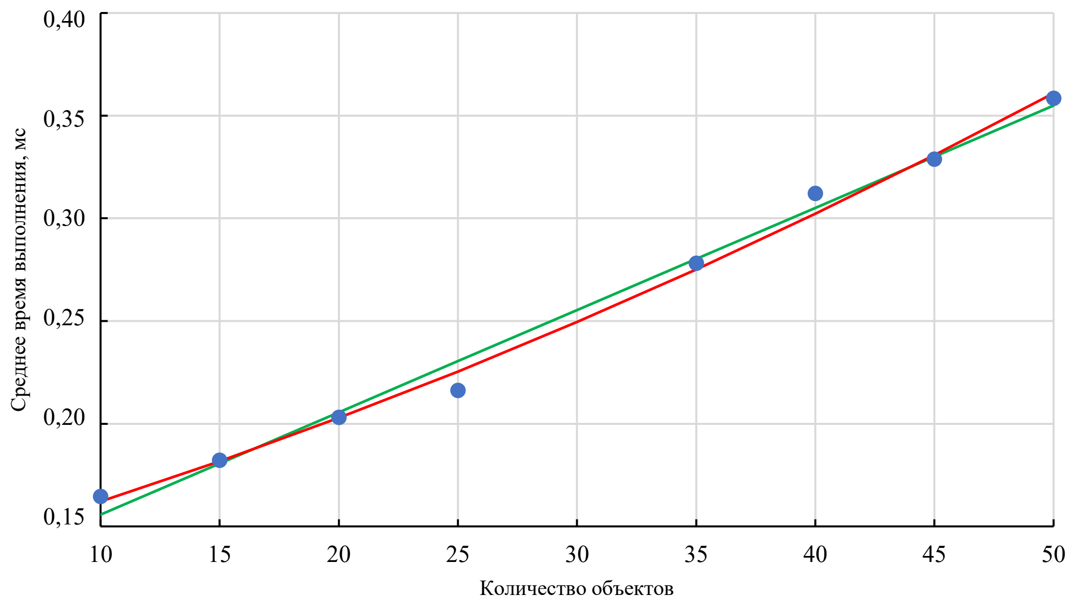


Рис. 6. Время выполнения алгоритма на пользовательских устройствах: ● — реальные данные; —— a = 0,00498, b = 0,10593 — линейная аппроксимация; —— a = 0,00003, b = 0,00317, c = 0,12743 — квадратичная аппроксимация

На указанном диапазоне невозможно сразу определить точную сложность вычисления алгоритма. Как видно из рис. 6, данные близки к линейной и квадратичной аппроксимации. С помощью метода остаточной суммы квадратов рассчитана количественная оценка обеих аппроксимаций и получены значения 0,00035 и 0,00021 соответственно [10].

Для подтверждения гипотезы о квадратичной зависимости на персональном компьютере запустили аналогичный эксперимент для диапазона [10–10000] объектов. Рис. 7 подтверждает гипотезу, значит алгоритму можно присвоить сложность O(n^2). Впрочем, ситуация с 10000 объектами, скорее, теоретическая, и на практике в дополненной реальности пользователь вряд ли будет работать более чем с 1–2 десятками объектов.

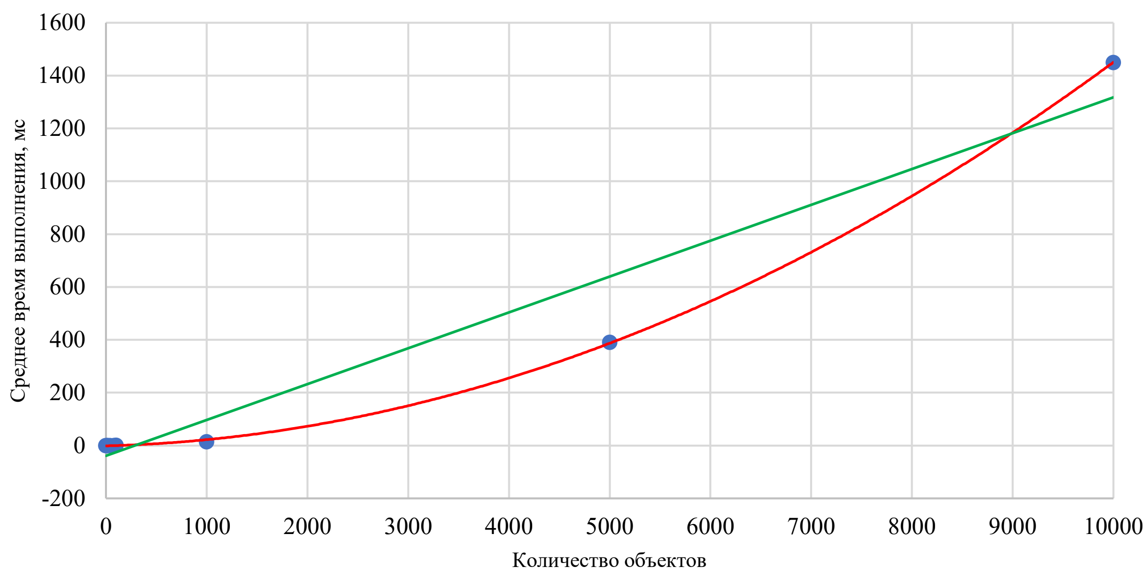


Рис. 7. Время выполнения алгоритма для большого количества объектов: ● — реальные данные; —— a = 0,1365, b = –45,455 — линейная аппроксимация; —— a = 0,00001, b = 0,0103, c = –1,6178 — квадратичная аппроксимация

Сопоставили время выполнения на разных пользовательских устройствах. Отобрали 10 самых популярных моделей и по результатам вычислений построили диаграмму (рис. 8).

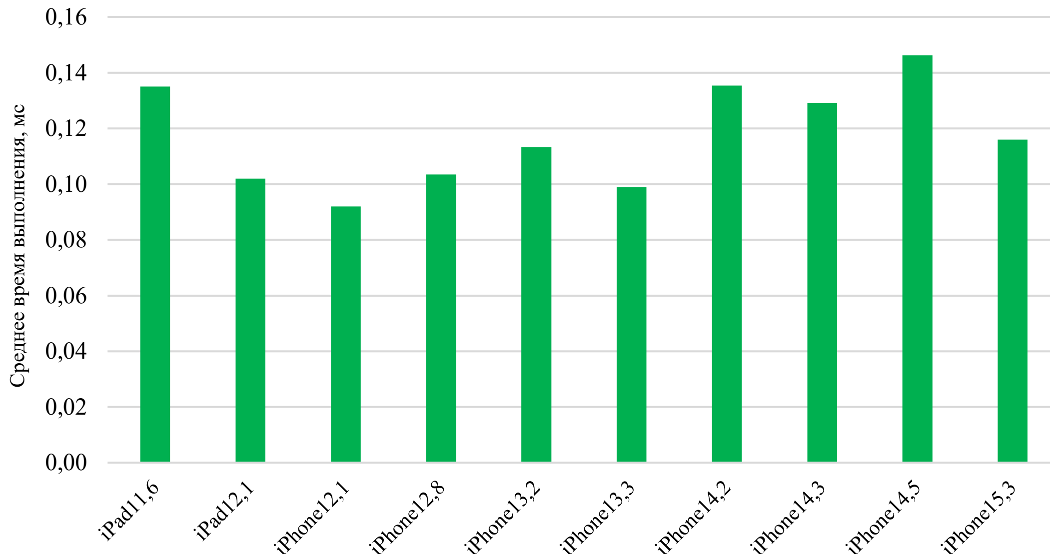
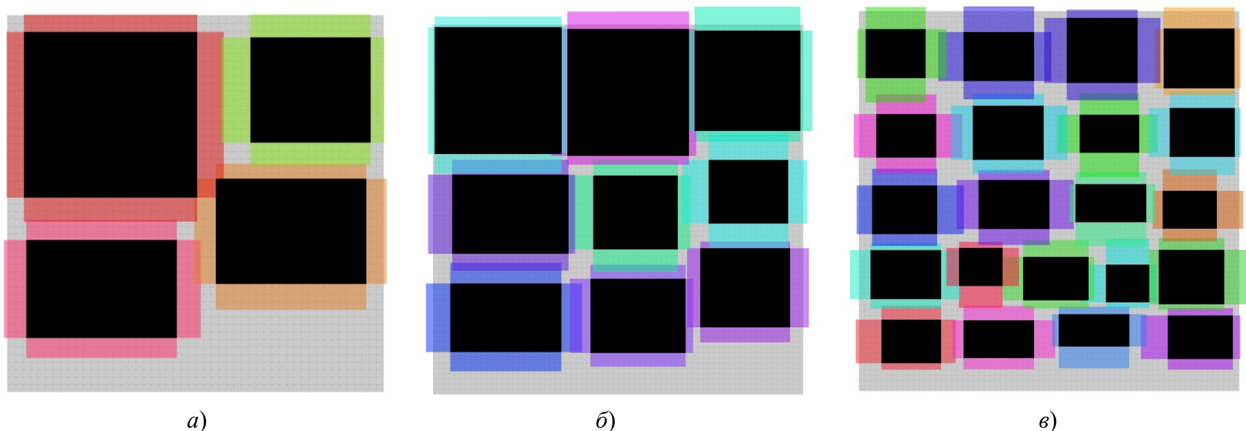


Рис. 8. Сравнение скорости вычисления на разных устройствах для 10 объектов

Минимальное зарегистрированное время выполнения — 0,093 мс, максимальное — 0,146 мс. Для данной выборки корреляция между моделью устройства и временем выполнения — всего 0,177. Это довольно низкое значение.

Расчеты показали высокую эффективность двумерного алгоритма. Это обусловлено разбиением всей совокупности объектов на отдельные строки и использованием в каждой строке быстрого одномерного алгоритма, описанного в начале статьи. Этот алгоритм позволяет решить задачу с меньшими затратами ресурсов и времени.

На рис. 9 представлены дополнительные визуализации схем расстановки для разного количества объектов и их параметров.



а) *б*) *в*)

Рис. 9. Примеры расстановки разного количества объектов:
а — 4 объекта; *б* — 9 объектов; *в* — 21 объект

Итак, предлагаемый алгоритм двумерного размещения позволяет работать с набором виртуальных объектов. Каждый из них характеризуется определенными размерами и зонами комфортности. Алгоритм предназначен для оптимального расположения таких объектов в прямоугольном физическом пространстве, которое воссоздает окружение пользователя.

Обсуждение и заключение. Для ранее описанной одномерной задачи предложен и реализован в программном коде эффективный алгоритм оптимального размещения виртуальных объектов. Для двумерного случая построена модель оптимального размещения. На ее основе разработан эффективный алгоритм, реализованный в программном коде.

Проанализирована производительность алгоритма, которая измеряется временем выполнения. Установлено, что нет значимой корреляции между временем выполнения и моделью устройства. Среднее время — доли миллисекунды даже для больших партий объектов. Это говорит об относительно стабильной производительности алгоритма в различных условиях. Однако нельзя исключить возможное влияние других

непроверенных факторов. Для полной характеристики зависимостей производительности нужны дальнейшие исследования.

Обозначим несколько направлений будущей работы для повышения производительности и адаптивности алгоритма. Это, во-первых, совершенствование решения, которое позволит использовать полные размеры объектов, по возможности без пересечений комфортных зон. Их размеры будут уменьшаться только в случае крайней необходимости. Это должно обеспечить оптимальное использование пространства и дальнейшее улучшение интерактивного опыта пользователя.

Во-вторых, включение вращения элементов в алгоритм повысит гибкость в их расположении и даст возможность лучше использовать пространство. К тому же это позволит алгоритму учитывать больше разных объектов, тем самым расширяя его практическое применение.

Заметим, что в приложении с дополненной реальностью расстановка пользователем трех и более объектов — достаточно трудоемкая задача. Она требует значительного времени и существенно затрудняет работу.

Предложенная технология размещения объектов в 2D позволяет оптимально позиционировать виртуальный контент для улучшения пользовательского опыта в дополненной реальности. Автоматизированный расчет расположения сокращает ручную работу и дает возможность сосредоточиться на полноценном взаимодействии с AR.

Научные изыскания в данном направлении ведут к бесшовной интеграции виртуального и физического пространств. Результаты могут применить на практике разработчики очков дополненной реальности, которые сталкиваются с проблемой быстрого интеллектуального позиционирования объектов в зависимости от пользовательских предпочтений и контекста. Кроме того, итоги работы могут представлять интерес для:

– инженеров, работающих над умными домашними системами;

– дизайнеров интерфейсов, для которых важно эффективно и гармонично сочетать элементы управления и информацию на экране.

Введение нечеткой логики позволяет разработчикам адаптировать решение под конкретные задачи и сценарии использования. В будущих исследованиях целесообразно изучить и задействовать пользовательский опыт, включать дополнительные ограничения на позиционирование объектов.

Список литературы

1. Yahya Ghazwani, Shamus Smith. Interaction in Augmented Reality. In: *Proc. 4th Int. Conf. on Virtual and Augmented Reality Simulations*. New York, NY: Association for Computing Machinery; 2020. P. 39–44. https://doi.org/10.1145/3385378.3385384

2. Müller J., Butscher S., Feyer S.P., Reiterer H. Studying Collaborative Object Positioning in Distributed Augmented Realities. In: *Proc. 16th Int. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia.* New York, NY: Association for Computing Machinery; 2017. P. 123–132. https://doi.org/10.1145/3152832.3152856

3. Regenbrecht H.T, Wagner M.T. Interaction in a Collaborative Augmented Reality Environment. In: *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY: Association for Computing Machinery; 2002. P. 504–505. https://doi.org/10.1145/506443.506451

4. Alpatova M.V., Glazkov A.V., Rudyak Yu.V. Mathematical Model of Rational Location of Augmented Reality Objects in User's Environment. In: *Proc Int. Sci. Conf. “Smart Nations: Global Trends In The Digital Economy”*. Cham: Springer; 2022. P. 248–254. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94873-3_30

5. Гимади Э.Х, Залюбовский В.В. Задача упаковки в контейнеры: асимптотический подход. *Известия высших учебных заведений.* 1997;(12(427)):25–33. URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F1486686603/03_12.PDF (дата обращения: 20.09.2023).

6. Алпатова М.В., Рудяк Ю.В. Размещение нескольких виртуальных объектов в физическом пространстве в дополненной реальности. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):203–211. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-203-211

7. Karev G.B. Directionality in Right, Mixed and Left Handers. *Cortex*. 1999;35(3):423–431. https://doi.org/10.1016/S0010-9452%2808%2970810-4

8. Sung Lae Kim, Hae Jung Suk, Jeong Hwa Kang, Jun Mo Jung, Laine T.H., Westlin J. Using Unity 3D to Facilitate Mobile Augmented Reality Game Development. In: *Proc. IEEE World Forum on Internet of Things* (*WF-IoT*). New York City: IEEE; 2014. P. 21–26. https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2014.6803110

9. Warner R.A. Using Z Scores for the Display and Analysis of Data. In book: *Optimizing the Display and Interpretation of Data*. Amsterdam: Elsevier; 2016. P. 7–51. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804513-8.00002-X

10. Wolfe D.A. Ranked Set Sampling: Its Relevance and Impact on Statistical Inference. *ISRN Probability and Statistics*. 2012;2012:568385. https://doi.org/10.5402/2012/568385

References

1. Yahya Ghazwani, Shamus Smith. Interaction in Augmented Reality. In: *Proc. 4th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations*. New York, NY: Association for Computing Machinery; 2020. P. 39–44. https://doi.org/10.1145/3385378.3385384

2. Müller J, Butscher S, Feyer SP, Reiterer H. Studying Collaborative Object Positioning in Distributed Augmented Realities. In: *Proc. 16th Int. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia.* New York, NY: Association for Computing Machinery; 2017. P. 123–132. https://doi.org/10.1145/3152832.3152856

3. Regenbrecht HT, Wagner MT. Interaction in a Collaborative Augmented Reality Environment. In: *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY: Association for Computing Machinery; 2002. P. 504–505. https://doi.org/10.1145/506443.506451

4. Alpatova MV, Glazkov AV, Rudyak YuV. Mathematical Model of Rational Location of Augmented Reality Objects in User's Environment. In: *Proc Int. Sci. Conf. "Smart Nations: Global Trends In The Digital Economy"*. Cham: Springer; 2022. P. 248–254. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94873-3_30

5. Gimadi EKh, Zalyubovskii VV. Bin Packing: Asymptotically Exact Approach. *Russian Mathematics. (Iz. VUZ).* 1997;(12(427)):25–33. URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F1486686603/03_12.PDF (accessed: 20.09.2023). (In Russ.).

6. Alpatova MV, Rudyak YuV. Placement of Multiple Virtual Objects in Physical Space in Augmented Reality Applications. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):203–211. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-203-211

7. Karev GB. Directionality in Right, Mixed and Left Handers. *Cortex*. 1999;35(3):423–31. https://doi.org/10.1016/S0010-9452%2808%2970810-4

8. Sung Lae Kim, Hae Jung Suk, Jeong Hwa Kang, Jun Mo Jung, Laine TH, Westlin J. Using Unity 3D to Facilitate Mobile Augmented Reality Game Development. In: *Proc. IEEE World Forum on Internet of Things* (*WF-IoT*). New York City: IEEE; 2014. P. 21–26. https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2014.6803110

9. Warner RA. Using Z Scores for the Display and Analysis of Data. In book: *Optimizing the Display and Interpretation of Data*. Amsterdam: Elsevier; 2016. P. 7–51. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804513-8.00002-X

10. Wolfe DA. Ranked Set Sampling: Its Relevance and Impact on Statistical Inference. *ISRN Probability and Statistics*. 2012;2012:568385. https://doi.org/10.5402/2012/568385

Поступила в редакцию 23.10.2023
Поступила после рецензирования 20.11.2023
Принята к публикации 27.11.2023

Об авторах:

Марианна Валерьевна Алпатова, старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38) SPIN-код: 1458-7868, ScopusID, ORCID, m.v.alpatova@yandex.ru

Юрий Владимирович Рудяк, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информатики и информационных технологий Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38), SPIN-код: 4283-0952, ScopusID, ORCID, rudyak@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

М.В. Алпатова — формирование основной концепции, постановка целей и задач исследования, подготовка текста, формулирование выводов.

Ю.В. Рудяк — научное руководство, расчеты, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 23.10.2023
Revised 14.11.2023
Accepted 22.11.2023

About the Authors:

Marianna V. Alpatova, Senior Lecturer of the Computer Science and Information Technology Department, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023, RF) SPIN-code: 1458-7868, ScopusID, ORCID, m.v.alpatova@yandex.ru

Yuri V. Rudyak, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Computer Science and Information Technology Department, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023, RF), SPIN-code: 4283-0952, ScopusID, ORCID, rudyak@mail.ru

Claimed contributorship:

MV Alpatova: basic concept formulation, setting of research objectives and tasks, text preparation, formulation of conclusions.

YuV Rudyak: academic advising, computational analysis, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 004.94/ 519.6
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-422-432

Научная статья



EDN: RBUFLG

Web-приложение для математического моделирования нестационарного течения нефти в пористой среде

А.А. Мазитов
Институт нефтехимии и катализа Уфимского федерального центра Российской академии наук, г. Уфа, Российская Федерация
✉ mazitov.ainur13@gmail.com

Аннотация

Введение. Основу для анализа и интерпретации данных гидродинамических исследований составляют теоретические модели и вычислительные алгоритмы. Но, несмотря на востребованность данной тематики, многие вопросы, связанные с нестационарными течениями жидкостей в нефтяных пластах, все еще требуют решений. Поэтому математические постановки задач, связанных с учетом нестационарного течения жидкости, разработка эффективных численных методов и алгоритмов, их решение с применением современных web-технологий являются актуальными. Цель данной работы — разработка web-приложения для математического моделирования процесса фильтрации жидкости в однопоровых коллекторах при проведении гидродинамического исследования на добывающей скважине.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи применены методы механики сплошной среды и вычислительной математики. Представлена модель течения нефти в однопоровом коллекторе. При разработке приложения использованы языки программирования Python и JavaScript. Результаты расчетов хранятся в реляционной базе данных, реализованной средствами PostgreSQL.

Результаты исследования. Разработано новое web-приложение для моделирования процесса фильтрации нефти в однопоровых коллекторах, которое применимо для изучения флюидодинамических процессов и может быть использовано для прогноза дебитов, добычи и расчета оптимальных режимов работы скважин.

Обсуждение и заключение. Разработанное web-приложение позволяет строить поля давления и температуры в пласте около работающей и остановленной добывающей скважины и на различных расстояниях от нее. Данная информация дает возможность оперативно оценивать длительность гидродинамических исследований, а также регулировать работу скважин. Приложение может быть развернуто в существующей сетевой инфраструктуре, пользоваться всем функционалом, подключаясь к удаленному серверу. Оно оптимизировано для использования на различных платформах и имеет широкие перспективы дальнейшего развития.

Ключевые слова: web-приложение, математическая модель, гидродинамические исследования, база данных, давление, температура

Благодарности. Автор выражает благодарность консультанту научного проекта Ю.О. Бобренёвой за ценные замечания и постоянную поддержку при выполнении проекта.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20–37–90080 «Математическое моделирование нестационарного течения многофазного потока в пористой среде».

Для цитирования: Мазитов А.А. Web-приложение для математического моделирования нестационарного течения нефти в пористой среде. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(4):422–432. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-422-432

Original article

Web Application for Mathematical Modeling of Unsteady Oil Flow in Porous Medium

Aynur A. Mazitov
Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Centre, RAS, Ufa, Russian Federation
✉ mazitov.ainur13@gmail.com

Abstract
Introduction. The analysis and interpretation of hydrodynamic research data are based on theoretical models and computational algorithms. Despite the demand for this topic, numerous issues related to unsteady fluid flows in oil reservoirs still require solutions. Therefore, mathematical setting of problems related to the account of unsteady fluid flow, the development of effective numerical methods and algorithms, their solution using modern web technologies are pressing. This study is aimed at developing a web application for mathematical modeling of the process of fluid filtration in single- porosity reservoirs when conducting a hydrodynamic study at a production well.
Materials and Methods. To solve the problem, the methods of continuum mechanics and computational mathematics were applied. A model of oil flow in a single-porosity reservoir was presented. Python and JavaScript programming languages were used in the development of the application. The calculation results were stored in a relational database implemented using PostgreSQL tools.
Results. A new web application has been developed for modeling the oil filtration process in single- porosity reservoirs. It is applicable for studying fluid dynamic processes and can be used to predict flowrates, production and calculation of optimal well operation modes.
Discussion and Conclusion. The developed web application provides for building pressure and temperature fields in the reservoir near a flowing and shut-in production well and at various distances from it. This information makes it possible to urgently assess the duration of hydrodynamic studies, as well as to regulate the operation of wells. The application can be deployed in an existing network infrastructure and use all the functionality by connecting to a remote server. It is optimized for use on various platforms and has broad prospects for further development.

Keywords: web application, mathematical model, hydrodynamic studies, database, pressure, temperature

Acknowledgements. The author would like to thank Yu.O. Bobreneva, the consultant of the scientific project, for valuable comments and constant support in the implementation of the project.

Funding information. The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 20–37–90080 “Mathematical Modeling of Unsteady Multiphase Flow of in Porous Environment”.

For citation. Mazitov AA. Web Application for Mathematical Modeling of Unsteady Oil Flow in Porous Medium. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(4):422–432. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-422-432

Введение. Российская Федерация является одной из ведущих стран мира по объемам производства нефти. Каждый год на месторождениях страны добывается свыше 500 миллионов тонн нефти, подавляющая часть которой в сыром виде экспортируется в страны азиатско-тихоокеанского региона, Европы и ближнего зарубежья. Развитие нефтяной промышленности в нашей стране оказывает влияние на другие отрасли и сферы деятельности, поэтому решение задач по эффективному освоению и разработке нефтяных месторождений было и остается перспективным. Основой современных научных технологий нефтяной разработки является комплексное изучение свойств продуктивных коллекторов, содержащихся в них веществ и происходящих сложных процессов при течении флюида.

Главная цель при добыче нефти — увеличение темпа отбора флюида из продуктивного пласта и поддержание пластового давления. Планирование работ по эффективному освоению и оптимальной эксплуатации нефтяной скважины носит комплексный характер, связанный с гидродинамическими процессами, происходящими при течении жидкости в системе «скважина — пласт» [1]. Для изучения продуктивных свойств пластов и жидкостей применяются гидродинамические исследования скважин (ГДИС). Средствами ГДИС проводятся замер совокупности данных коллектора с использованием глубинных или устьевых приборов, а также последующая обработка замеров и интерпретация полученных данных (продуктивность, фильтрационные свойства жидкостей, тип коллектора и т. д.) [2].

При исследовании коллекторов с использованием ГДИС применяются теоретические модели, основанные на классических уравнениях и законах, а также вычислительные алгоритмы для моделирования процессов фильтрации флюидов. Однако, несмотря на востребованность данной тематики, многие вопросы, связанные

с математическими и вычислительными аспектами моделирования нестационарных потоков в коллекторах, требуют дальнейшей разработки и развития [3, 4].

Для анализа и интерпретации результатов ГДИС существует ряд отечественных («Автон», «Гидрозонд») и зарубежных (OLGA, LedaFlow, FlowVision, MAST, Saphir NL) программ [5–7]. При всех имеющихся преимуществах они обладают некоторыми недостатками, такими как невозможность проведения полного спектра расчетов, просмотра и изменения параметров исходных моделей. Все представленные программные продукты являются настольными, коммерческими, сложными в эксплуатации, многие обладают перегруженным интерфейсом. В условиях, когда необходимо оперативно или в режиме реального времени провести расчет, большие коммерческие симуляторы оказываются малоэффективными. Поэтому для выполнения схожих работ предлагается использовать web-приложение, обладающее множеством преимуществ.

В отличие от настольных, web-приложения независимы от операционной системы и вычислительных мощностей персональных компьютеров. Программный код web-приложения пишется единожды для конкретной платформы, где оно будет развернуто. Web-приложения выделяются простой реализацией, легкостью применения, высокой производительностью. Их основными характеристиками являются доступность, надежность, безопасность, масштабируемость, гибкость, кросс-платформенность. Для работы с web-приложением от персонального компьютера пользователя необходимо находиться в одной сети с сервером, на котором оно развернуто. Такой сетью может быть локальная сеть предприятия или глобальная сеть Интернет, если речь идет о веб-сайтах. По сравнению с настольными, у web-приложений можно выделить один недостаток — время отклика, зависящее от удаленности персонального компьютера от сервера.

Логика работы web-приложения отличается от настольного, которое запускается и выполняет код на компьютере пользователя. Поэтому настольные приложения отличаются более расширенным и отзывчивым пользовательским интерфейсом и позволяют реализовывать более сложную бизнес-логику работы. Однако с развитием web-технологий это достоинство с каждым годом нивелируется, и web-приложения все чаще бывают способны реализовывать сложные пользовательские сценарии. Таким образом, в части реализации производственных задач web-приложения становятся более конкурентными.

В связи с этим математические постановки задач с учетом нестационарного течения жидкости во всех его элементах (пласт, стволовые трубы, проточные каналы), разработка эффективных численных методов и алгоритмов, последующие их решения с применением современных технологий web-разработки являются актуальными. Использование полученных численных алгоритмов позволяет количественно описывать поведение давления и температуры в нефтяных скважинах. Алгоритм и web-приложение предоставят пользователям, специалистам в области анализа и интерпретации гидродинамических исследований, удобный и легко адаптируемый к их практическим потребностям инструмент для расчета сложных процессов, происходящих при разработке пористых коллекторов.

Материалы и методы. Рассматривается добывающая скважина, на которой проводится гидродинамическое исследование методом кривой восстановления давления. Скважина эксплуатирует терригенный коллектор, который относится к однопоровым. Пласт является неограниченным, воздействие соседних скважин отсутствует. Течение флюида в пласте — горизонтальное, перетоки между пропластками отсутствуют. Скважина работает в установившемся режиме с постоянным забойным давлением. На границе контура поддерживаются постоянные давление и температура. Для проведения исследования измерительный прибор опускается на глубину верхних дыр перфорации. Расчет динамики давления и температуры проводится в пространственно-одномерном случае.

При численном моделировании важно учитывать все параметры пласта и флюида, чтобы достичь наиболее качественного описания процесса массопереноса нефти в однопоровом коллекторе. Рассмотрим математическую модель, описывающую процесс фильтрации нефти в однопоровом коллекторе. Основой для модели служат уравнения пьезопроводности и теплопроводности. Математическая модель в радиальных координатах представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{gathered}\varphi c_t \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{k}{\mu} r \frac{\partial P}{\partial r}\right), \\ c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r}\right) - c\rho u\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial r}\right) + \eta\varphi c\rho \frac{\partial P}{\partial t},\end{gathered} \qquad (1)$$

где φ — пористость пласта; c_t — сжимаемость породы (1/Па); k — проницаемость пласта (м^2); μ — вязкость жидкости (Па с); P — пластовое давление (Па); r — расстояние до стенки скважины (м); t — время (с); c — теплоемкость нефти (Дж/кг К); ρ — плотность нефти (кг/м^3); T — пластовая температура (К); λ —

теплопроводность пористой среды (Вт/м[3]·К); u — скорость конвективного переноса тепла в пористой среде (м/с); ε — коэффициент Джоуля-Томсона (К/Па); η — коэффициент адиабатического расширения (К/Па).

Первое уравнение описывает процесс изменения давления в пласте, второе — процесс теплопереноса жидкости.

Скорость конвективного переноса тепла в пористой среде определяется выражением

$$u = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial P}{\partial r}. \tag{2}$$

Система уравнений (1) задается в пространственно-временном интервале:

$$\begin{gathered} r_w \le r \le R, \\ 0 \le t \le t_к, \end{gathered} \tag{3}$$

где r_w — радиус скважины; R — расстояние до границы контура исследования (м); $t_к$ — время исследования (с).

Исходя из поставленных выше условий для скважины и рассматриваемой области для системы (1) начальные и граничные условия задаются следующим образом:

$$\begin{gathered} t = 0 : P = P_0, T = T_0, r_w \le r \le R, \\ r = r_w : P = P_0, T = T_0, t > 0, \\ r = R : \frac{\partial P}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, t > 0. \end{gathered} \tag{4}$$

После определения начальных и граничных условий получена модель процесса фильтрации нефти в однопоровом коллекторе (1)–(4), характеризующая перераспределение давления и температуры в пласте.

Первоначальным этапом решения системы является приведение его к дискретному виду. Для этого используется метод конечных разностей [8]. Строится равномерная пространственно-временная сетка:

$$\begin{gathered} \overline{G_h} = \left\{ r_i = r_w + (i-1)h, i = 1, 2, ..., N, h = \frac{R - r_w}{N-1} \right\}, \\ \overline{G_t} = \left\{ t_n = n\tau, n = 0, 1, ..., M, \tau = \frac{t_к}{M} \right\}, \end{gathered} \tag{5}$$

где h — шаг сетки по пространству; τ — шаг сетки по времени; N — число узлов по пространству; M — число узлов по времени.

После замены дифференциальных выражений разностными аналогами получается система уравнений:

$$\begin{gathered} \varphi c_t \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\tau} = \frac{k}{\mu}\frac{1}{r_i}\frac{r_{i+\frac{1}{2}} P_{i+1}^{n+1} - \left(r_{i+\frac{1}{2}} + r_{i-\frac{1}{2}} \right) P_i^{n+1} + r_{i-\frac{1}{2}} P_{i-1}^{n+1}}{h^2}, \\ c\rho \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \frac{\lambda}{r_i}\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2} - c\rho u_i \left(\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} + \varepsilon \frac{P_{i+1}^{n+1} - P_i^{n+1}}{h} \right) + \\ \eta\varphi c\rho \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\tau}, i = 2, ..., N-1, n \ge 0. \end{gathered} \tag{6}$$

Система (6) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которая сводится к трехточечному уравнению общего вида:

$$A_i y_{i+1}^{n+1} - B_i y_i^{n+1} + C_i y_{i-1}^{n+1} = F_i, i = 1, ..., N, n \ge 0. \tag{7}$$

Коэффициенты равны:

$$\begin{gathered} A_i^P = \frac{k}{\mu h^2}\frac{r_{i+\frac{1}{2}}}{r_i}, B_i^P = \left(\frac{k}{\mu h^2}\frac{r_{i+\frac{1}{2}} + r_{i-\frac{1}{2}}}{r_i} + \frac{\varphi c_t}{\tau} \right), C_i^P = \frac{k}{\mu h^2}\frac{r_{i-\frac{1}{2}}}{r_i}, F_i^P = -\frac{\varphi c_t}{\tau} P_i^n, \\ A_i^T = \frac{\lambda}{h^2 r_i}, B_i^T = \left(\frac{2\lambda}{h^2 r_i} + \frac{c\rho u_i}{\tau} + \frac{c\rho}{\tau} \right), C_i^T = \frac{\lambda}{h^2 r_i}, \\ F_i^T = -\frac{c\rho}{\tau}\left(u_i + 1 \right) T_i^n + c\rho u_i \varepsilon \frac{P_{i+1}^{n+1} - P_i^{n+1}}{h} - \eta\varphi c\rho \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\tau}. \end{gathered} \tag{8}$$

Система (7) решается методом скалярной прогонки [9, 10]. Задача является нестационарной, поэтому метод применяется для определения пространственного распределения давления и температуры пласта на каждом

временном слое [11, 12]. Задача решается последовательно, на первом этапе решается уравнение для давления, на втором — для температуры.

Для автоматизации решения задачи разработано web-приложение. В общем виде его структура представлена на рис. 1. В ней выделяются пять основных компонентов: входные информационные потоки, выходные информационные потоки, методы обработки информации, технические средства обработки информации, база данных [13, 14].



Рис. 1. Структура приложения в общем виде

Входными информационными потоками являются данные о параметрах модели, а выходными — графики, отражающие временные или пространственные зависимости забойного давления и температуры. Под методами обработки информации понимаются численные методы и методы интерпретации гидродинамических исследований. Техническими средствами обработки информации являются сервер, на котором размещено приложение, и персональный компьютер пользователя. Для хранения входных параметров и результатов расчетов используется база данных.

Конечный вид программного обеспечения зависит от средств, выбранных для его разработки. Средствами разработки являются парадигмы и языки программирования, среды и технологии для разработки. Выбор инструментария влияет на способ реализации задачи, критерии качества программного обеспечения, представление данных и тип графического интерфейса пользователя. Для разработки приложения в качестве языка программирования для серверной части выбран Python с использованием микрофреймворка Flask, для клиентской части — JavaScript с Vue.js [15, 16]. В качестве СУБД для проектирования и разработки базы данных используется PostgreSQL [17].

Результаты исследования. Разработанное программное обеспечение представляет собой кросс-платформенное клиент-серверное web-приложение. Хранение данных и вычисления происходят на web-сервере, с которым пользователь взаимодействует через браузер (поддерживаются все современные интернет-браузеры). Клиентская часть может использоваться на широком спектре платформ (ПК, ноутбуки, смартфоны) и операционных систем (Windows, MacOS, Android, iOS).

Большую часть главного окна web-приложения занимает средство построения графиков температуры и давления. Графики строятся после произведения расчета путем выбора соответствующего пункта меню. Также имеется возможность построения графиков по ранее произведенным расчетам, для этого выбирается необходимый расчет в левой части окна. Графики строятся по пространственным и временным координатам. Для изменения вида графика выбираются соответственные пункты в верхней части окна.

Все произведенные расчеты хранятся в разработанной реляционной базе данных flowcalcdb, структура которой представлена на рис. 2.

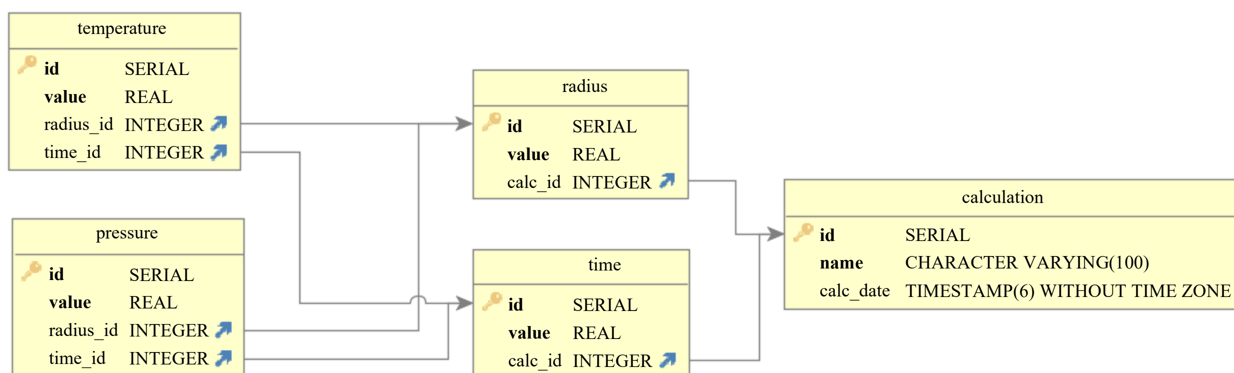


Рис. 2. Структура базы данных flowcalcdb

В общей сложности база данных содержит пять таблиц, которые находятся в третьей нормальной форме [18]. Все таблицы имеют первичные ключи. Главная таблица, calculation, хранит название расчета и дату его произведения. Две зависимые от нее таблицы, radius и time, хранят информацию о пространственно-временных координатах. Таблицы temperature и pressure хранят значения температуры и давления соответственно.

В разработанном приложении проведен ряд вычислительных экспериментов, позволяющих оценить результат его работы. Для проведения моделирования использованы значения из таблицы 1.

Таблица 1

Начальные и граничные условия, параметры расчета

Параметр	Значение	Единица измерения
Радиус скважины, r_w	0,102	м
Радиус исследования, R	100	м
Время исследования, t	24	ч
Начальное давление, P_0	25	МПа
Конечное давление, Рк	30	МПа
Проницаемость, k	1e-14	$м^2$
Пористость	0,2	
Вязкость нефти, μ	1,10e-3	Па·с
Сжимаемость нефти	1,58e-9	1/Па
Теплоемкость, c_ρ	1,4	МДж/ $м^3$·К
Теплопроводность, λ	0,6	Вт/м·К
Коэффициент Джоуля-Томсона, ε	3,94e-7	К/Па
Коэффициент адиабатического расширения, η	3,15e-7	К/Па
Начальная температура, T_0	363,15	К
Количество точек по времени, N	1000	
Количество точек по пространству, M	1000	

С использованием данных из таблицы 1 построены графики распределения давления и температуры по пространству, представленные соответственно на рис. 3 и 4.

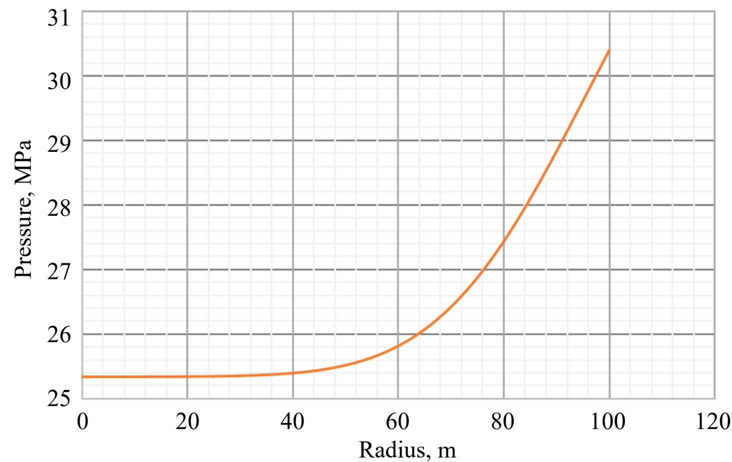


Рис. 3. Распределение давления по пространству в конечный момент времени

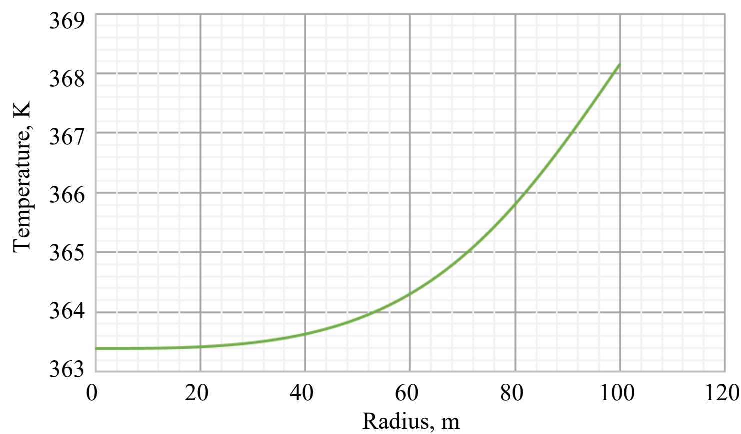


Рис. 4. Распределение температуры по пространству в конечный момент времени

Как следует из данных на рис. 3 и 4, после остановки скважины на гидродинамическое исследование наблюдается восстановление давления и температуры, причем чем дальше от стенок скважины, тем больше величина восстановления. На рис. 5 и 6 показано, как именно распределены давление и температура в различные моменты времени (6, 12, 24 ч.) после остановки скважины. Эта информация полезна специалистам по анализу и интерпретации гидродинамических исследований, поскольку позволяет оценить динамику давления и температуры и принять решение о продолжении или остановке исследования, а также проведении дополнительных мероприятий.

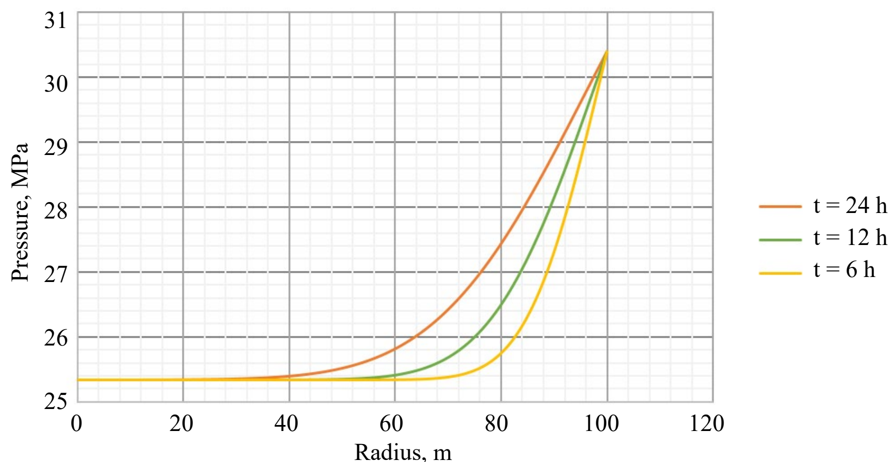


Рис. 5. Распределение давления по пространству в различные моменты времени

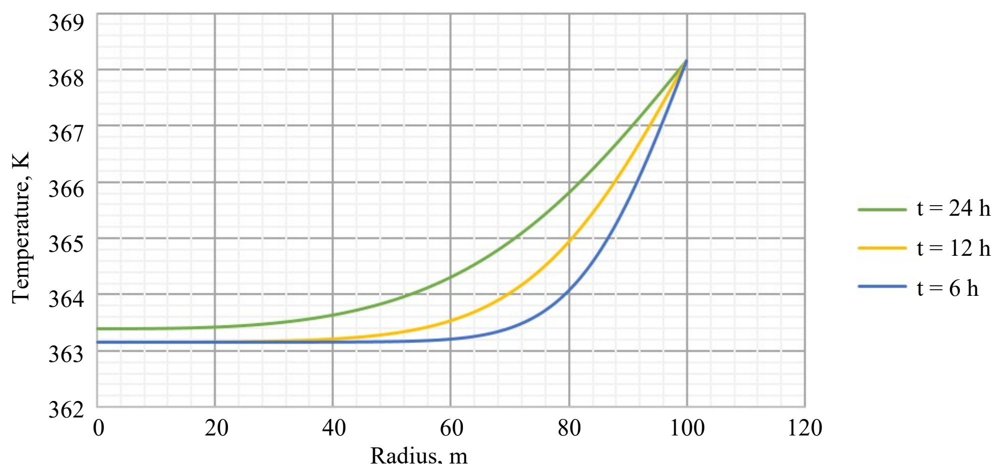


Рис. 6. Распределение температуры по пространству в различные моменты времени

На основе произведенных расчетов установлено, что наибольшее влияние на поведение давления и температуры оказывает проницаемость пласта. На рис. 7 и 8 изображены графики динамики давления и температуры в зависимости от различных значений проницаемости вблизи от стенок скважины (низкопроницаемый коллектор — 1 мД, среднепроницаемый — 10 мД, высокопроницаемый — 100 мД ($1Д = 10^{-12}м^2$)). Как видно на графиках, при увеличении проницаемости коллектора скорость восстановления давления и температуры увеличивается. На рис. 7 изображен график для реальных промысловых данных (проницаемость коллектора — 80 мД).

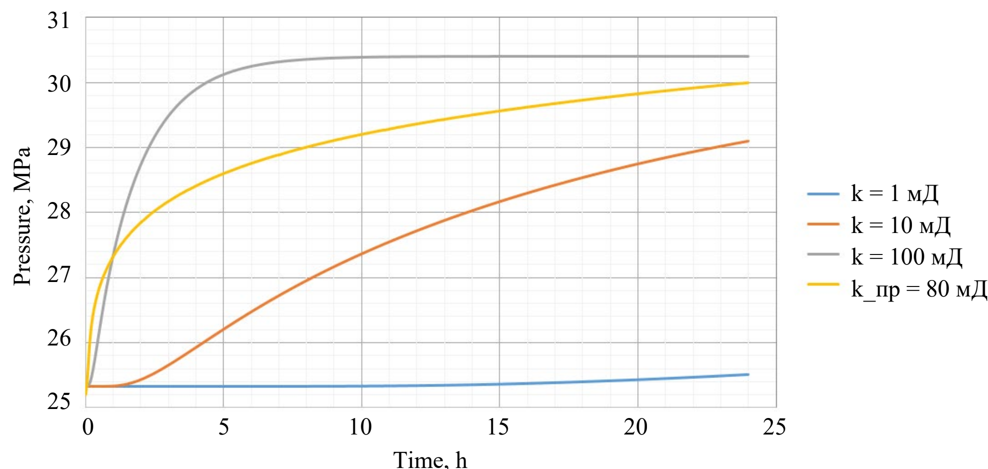


Рис. 7. Динамика давления при разных проницаемостях

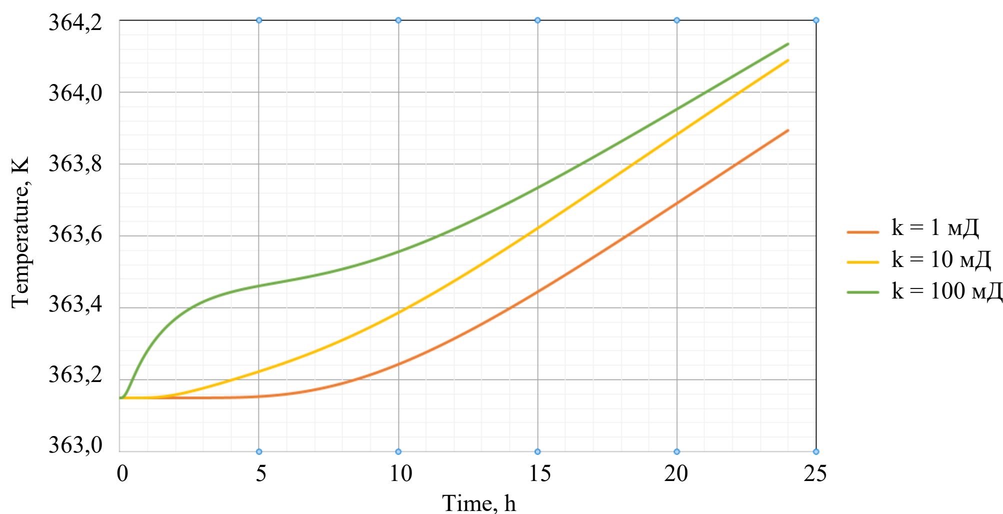


Рис. 8. Динамика температуры для разных проницаемостей

На основе динамики давления можно определить время проведения исследования (рис. 7). Например, для высокопроницаемого коллектора не имеет смысла проводить исследование более чем ~6 часов, поскольку после этого времени давление практически не меняется, а простой скважины является неэффективным, поскольку идут потери добычи.

Обсуждение и заключение. Разработанное web-приложение может быть использовано для анализа и интерпретации данных гидродинамических исследований. Web-приложение обеспечивает удобный пользовательский интерфейс и снижает затраты на поддержку. Оно может быть развернуто в существующей сетевой инфраструктуре или подключено к удаленному серверу для обеспечения полной функциональности. Применение приложения позволяет качественно и количественно оценивать поведение давления и температуры в однопоровых коллекторах. А хранение результатов расчетов в базе данных дает возможность проводить анализ с использованием результатов множества исследований, на основе которого можно составлять сводный отчет и формировать рекомендации по дальнейшему использованию скважины или месторождения в целом. Используемые модели являются устойчивыми и сходящимися. Графики строятся с помощью написанного web-приложения, и поэтому оно может использоваться на производстве.

Приложение имеет широкие перспективы развития, например, можно реализовать другие модели течения жидкости или предусмотреть наличие нескольких фаз. Также на момент написания данной работы остро встал вопрос об отказе от зарубежных коммерческих продуктов в пользу отечественных симуляторов. Поэтому разработка подобных продуктов является перспективной.

Список литературы

1. Hussein A. *Essentials of Flow Assurance Solids in Oil and Gas Operations: Understanding Fundamentals, Characterization, Prediction, Environmental Safety, and Management*, 1st ed. Houston, TX: Gulf Professional Publishing; 2022. 1122 p.

2. Камартдинов М.Р., Кулагина Т.Е., Мангазеев П.В., Панков М.В. *Гидродинамические исследования скважин*. Москва: ЮКОС; 2003. 810 с.

3. Bobreneva Yu.O., Mazitov A.A., Gubaydullin I.M. Researching the Mechanisms of Fluid Flow in the Fracture-Porous Reservoir Based on Mathematical Modeling. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2018;2(2):133–143.

4. Bobreneva Yu.O, Mazitov A.A., Gubaydullin I.M. Mathematical Modelling of Fluid Flow Processes in the Fracture-Porous Reservoir. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1096:012187. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012187

5. Лисаков С.А., Сыпин Е.В., Зырянова М.Н., Павлов А.Н., Галенко Ю.А. Моделирование процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2018;(1):40–52. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_bti-secna.pdf (дата обращения: 18.09.2023).

6. Жлуктов С.В., Аксенов А.А., Харченко С.А., Москалев И.В., Сушко Г.Б., Шишаева А.С. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-HPC. *Вычислительные методы и программирование.* 2010;11(3):234–245. URL: https://num-meth.ru/index.php/journal/article/view/395/402 (дата обращения: 18.09.2023).

7. Коновалов Д.А., Шматов Д.П., Дроздов И.Г., Дахин С.В. Моделирование нестационарного теплообмена в пористых элементах систем тепловой защиты с использованием программного комплекса FlowVision. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011;7(4):143–147. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-nestatsionarnogo-teploobmena-v-poristyh-elementah-sistem-teplovoy-zaschity-s-ispolzovaniem-programmnogo-kompleksa/viewer (дата обращения: 18.09.2023).

8. Мазитов А.А., Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М., Повещенко Ю.А. Математическое моделирование многофазного потока в однопоровом коллекторе. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2022;62:1–14. https://doi.org/10.20948/prepr-2022-62

9. Федоров А.А., Быков А.Н. Метод двухуровневого распараллеливания прогонки для решения систем алгебраических трехточечных уравнений на гибридных ЭВМ с многоядерными сопроцессорами. В*: Труды международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии»*. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2016. С. 334–346. URL: https://ceur-ws.org/Vol-1576/009.pdf (дата обращения: 18.09.2023).

10. Быков А.Н., Ерофеев А.М., Сизов Е.А. Федоров А.А. Метод распараллеливания прогонки на гибридных ЭВМ. *Вычислительные методы и программирование*. 2013;14(2):43–47. URL: https://num-meth.ru/index.php/journal/article/view/732 (дата обращения: 18.09.2023).

11. Bobreneva Yu.O., Rahimly P.I., Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Enikeeva L.V. On One Method of Numerical Modeling of Piezoconductive Processes of a Two-Phase Fluid System in a Fractured-Porous Reservoir. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;2131:022001. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/2/022001

12. Бобренёва Ю.О., Мазитов А.А., Губайдуллин И.М. Математическое моделирование процесса массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа. В: *Труды V международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии».* Самара: Новая техника; 2018. С. 1775–1780. URL: http://repo.ssau.ru/handle/Informacionnye-tehnologii-i-nanotehnologii/Matematicheskoe-modelirovanie-processa-massoperenosa-v-kollektore-treshinovatoporovogo-tipa-69518 (дата обращения: 18.09.2023).

13. Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф., Сафин Р.Р. Автоматизированная система структурной и параметрической идентификации кинетических моделей химических реакций с участием металлоорганических соединений на основе базы данных кинетических исследований. *Системы управления и информационные технологии*. 2014;4(58):10–16.

14. Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф., Спивак С.И. Структурная и параметрическая идентификация кинетических моделей химических реакций с участием металлоорганических соединений на основе информационно-вычислительной аналитической системы. *Химическая промышленность сегодня*. 2014;(11):18–27.

15. Grinberg M. *Flask Web Development,* 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc.; 2018. 312 p.

16. Au-Yeung J. *Vue.js 3 By Example: Blueprints to Learn Vue Web Development, Full-Stack Development, and Cross-Platform Development Quickly*. Birmingham, UK: Packt Publishing; 2021. 320 p.

17. Riggs S., Ciolli G. *PostgreSQL 14 Administration Cookbook.* Birmingham, UK: Packt Publishing; 2022. 608 p.

18. DeBarros A. *Practical SQL, 2nd Edition: A Beginner's Guide to Storytelling with Data.* San Francisco, CA: No Starch Press; 2022. 464 p.

References

1. Hussein A. *Essentials of Flow Assurance Solids in Oil and Gas Operations: Understanding Fundamentals, Characterization, Prediction, Environmental Safety, and Management,* 1st ed. Houston, TX: Gulf Professional Publishing; 2022. 1122 p.

2. Kamartdinov MR, Kulagina TE, Mangazeev PV, Pankov MV. *Hydrodynamic Studies of Wells*. Moscow: YUKOS; 2003. 810 p. (In Russ.)

3. Bobreneva YuO, Mazitov AA, Gubaydullin IM. Researching the Mechanisms of Fluid Flow in the Fracture-Porous Reservoir Based on Mathematical Modeling. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2018;2(2):133–143.

4. Bobreneva YuO, Mazitov AA, Gubaydullin IM. Mathematical Modelling of Fluid Flow Processes in the Fracture-Porous Reservoir. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1096:012187. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012187

5. Lisakov SA, Sypin EV, Zyryanova MN, Pavlov AN, Galenko YuA. Modeling the Process of Unsteady Combustion of a Methane-Air Mixture in Coal Mines. *Industrial Safety*. 2018;(1):40–53. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_bti-secna.pdf (accessed: 18.09.2023). (In Russ.)

6. Zhluktov SV, Aksenov AA, Kharchenko SA, Moskalev IV, Sushko GB, Shishaeva AS. Modeling of Separated Flows in CFD Software FlowVision-HPC. *Numerical Methods and Programming*. 2010;11(1):234–245. URL: https://num-meth.ru/index.php/journal/article/view/395/402 (accessed: 18.09.2023). (In Russ.)

7. Konovalov DA, Shmatov DP, Drozdov IG, Dahin SV. Simulation of Heat and Mass Transfer in Porous Elements of Thermal Protection Systems Using Software FlowVision. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2011;7(4):143–147.

8. Mazitov AA, Bobreneva YuO, Gubaydullin IM, Poveshchenko YuA. Mathematical Modeling of a Multiphase Flow in a Single-Pore Reservoir. *Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*. 2022;62:1–14. https://doi.org/10.20948/prepr-2022-62

9. Fedorov AA, Bykov AN. The Method of Two-Level Parallelization for Solving Tridiagonal Systems on Hybrid Computers with Multicore Coprocessors. In: *Proc. Int. Sci. Conf. Parallel Computational Technologies*. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center; 2016. P. 334–346.

10. Bykov AN, Erofeev AM, Sizov EA, Fedorov AA. A Parallel Sweep Method for Hybrid Supercomputers. *Numerical Methods and Programming*. 2013;14(2):43–47.

11. Bobreneva YuO, Rahimly PI, Poveshchenko YuA, Podryga VO, Enikeeva LV. On One Method of Numerical Modeling of Piezoconductive Processes of a Two-Phase Fluid System in a Fractured-Porous Reservoir. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;2131:022001. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/2/022001

12. Bobreneva YuO, Mazitov AA, Gubaydullin IM. Mathematical Modeling of Fluid Flow Processes in the Fractured-Porous Reservoir. In: *Proc. V Int. Conf. and the Youth School "Information Technologies and Nanotechnologies"*. Samara: Novaya tekhnika; 2018. P. 1775–1780. (In Russ.)

13. Gubaydullin IM, Koledina KF, Safin RR. Automated System for Structural and Parametric Identification of Kinetic Models of Chemical Reactions Involving Organometallic Compounds Based on the Kinetic Research Database. *Control Systems and Information Technologies*. 2014;58(4):10–16. (In Russ.)

14. Gubaydullin IM, Koledina KF, Spivak SI. Structural and Parametric Identification of Kinetic Models of Chemical Reactions Involving Organometallic Compounds Based on an Information and Computational Analytical System. *Chemical Industry Developments*. 2014;11:18–27. (In Russ.)

15. Grinberg M. *Flask Web Development,* 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc.; 2018. 312 p.

16. Au-Yeung J. *Vue.js 3 By Example: Blueprints to Learn Vue Web Development, Full-Stack Development, and Cross-Platform Development Quickly*. Birmingham, UK: Packt Publishing; 2021. 320 p.

17. Riggs S, Ciolli G. *PostgreSQL 14 Administration Cookbook.* Birmingham, UK: Packt Publishing; 2022. 608 p.

18. DeBarros A. *Practical SQL, 2nd Edition: A Beginner's Guide to Storytelling with Data.* San Francisco, CA: No Starch Press; 2022. 464 p.

Поступила в редакцию 02.10.2023
Поступила после рецензирования 31.10.2023
Принята к публикации 10.11.2023

Об авторе:

Айнур Асгатович Мазитов, стажер-исследователь лаборатории математической химии института нефтехимии и катализа Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (450075, РФ, Уфа, пр. Октября, 141), SPIN-код: 3903-2281, ORCID, mazitov.ainur13@gmail.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Received 02.10.2023
Revised 31.10.2023
Accepted 10.11.2023

About the Author:

Aynur A. Mazitov, Intern researcher, Laboratory of Mathematical Chemistry, Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (141, pr. Oktyabrya, Ufa, 450075, RF), SPIN-код: 3903-2281, ORCID, mazitov.ainur13@gmail.com

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 004.85
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-433-450

Научная статья



EDN: RKAOTZ

Моделирование процессов ультразвуковой дефектоскопии в задаче поиска и визуализации внутренних дефектов в узлах агрегатов и конструкций

Б.В. Соболь[1] ✉, **А.Н. Соловьев**[2], **П.В. Васильев**[1], **А.А. Ляпин**[1]
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
[2] Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, г. Симферополь, Российская Федерация
✉ b.sobol@mail.ru

Аннотация
Введение. Обратные задачи представляют собой специфический тип задач, где изучаются последствия явлений с целью определения их причин. Они широко используются в научных исследованиях, особенно тех, что имеют дело с большими объемами экспериментальных данных. В представленном исследовании рассмотрены обратные задачи в машиностроении и диагностике конструкций. Эти области требуют точных методов для выявления в различных материалах внутренних дефектов, которые могут иметь критические значения для обеспечения безопасности и эффективности использования технических конструкций. Несмотря на множество имеющихся методов дефектоскопии существует потребность в инновационных разработках, способных обеспечить ее более высокую точность и эффективность. В данном исследовании объединены различные научные методы и технологии, оно открывает новые перспективы в неразрушающем контроле для обнаружения внутренних дефектов в различных материалах и структурах. Его цель — развитие и внедрение методов неразрушающего контроля на основе нейросетевого аппарата для повышения точности идентификации дефектов, а также разработка нейросетевой модели и оценка ее эффективности для усовершенствования процесса ультразвуковой визуализации внутренних дефектов в твердых материалах. В связи с этим задача, которую предстоит решить для достижения поставленной цели, заключается в создании надежного инструмента для точной визуализации размеров, форм, местоположения и ориентации внутренних дефектов в различных материалах.
Материалы и методы. Применяется методика определения геометрических параметров дефектов в материалах с использованием неразрушающего контроля. Также используется метод, объединяющий моделирование распространения ультразвуковых волн в акустической среде и технологии искусственных нейронных сетей. Он выявляет нелинейные связи между геометрическими характеристиками дефектов и амплитудно-частотными и амплитудно-временными данными, полученными при анализе сигналов. Искусственные нейронные сети представляют собой модель, которая может обучаться на примерах, что позволяет эффективно решать задачи, которые сложно выразить в традиционных формах. В исследовании используется метод конечных разностей во временной области. Он применяется для идентификации и визуализации внутренних дефектов в материалах с использованием ультразвукового неразрушающего контроля и сверточных генеративных нейронных сетей.
Результаты исследования. Разработана сверточная нейронная сеть для визуализации внутренних дефектов с использованием техник ультразвукового неразрушающего контроля. Эта нейронная сеть успешно определяет размер дефектов, их местоположение, форму и ориентацию с высокой точностью и надежностью.
Обсуждение и заключение. Авторы подчеркивают ключевое влияние размера дефекта на точность ультразвуковой визуализации в различных сценариях. Проведенная валидация модели для трех различных случаев дефектов с разными механическими параметрами показала, что для успешной визуализации дефектов длина волны ультразвукового импульса должна быть в десятки раз меньше размера дефекта. При анализе влияния размера дефектов на точность работы нейронной сети выявлено, что ошибка визуализации увеличивается для дефектов меньшего размера.

Установлено также, что относительная скорость звука в материалах оказывает большее влияние на точность метода, чем относительная плотность материала. На основании полученных авторами результатов можно утверждать, что разработанные методики и технические решения имеют большое значение для будущих исследований в области дефектоскопии, обладают весомым потенциалом для научных и практических сфер применения.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, дефекты, ультразвуковой отклик, сверточные нейронные сети

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Соболь Б.В., Соловьев А.Н., Васильев П.В., Ляпин А.А. Моделирование процессов ультразвуковой дефектоскопии в задаче поиска и визуализации внутренних дефектов в узлах агрегатов и конструкций. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(4):433–450. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-433-450

Original article

Modeling of Ultrasonic Flaw Detection Processes in the Task of Searching and Visualizing Internal Defects in Assemblies and Structures

Boris V. Sobol[1] ✉, **Arkadiy N. Soloviev**[2], **Pavel V. Vasiliev**[1] **Alexandr A. Lyapin**[1]

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russian Federation

✉ b.sobol@mail.ru

Abstract

Introduction. Inverse problems are a specific type of tasks where the consequences of phenomena are studied to identify their causes. They are widely used in scientific studies, specifically, those dealing with large amounts of experimental data. In the presented paper, inverse problems in mechanical engineering and structural diagnostics are considered. These areas require precise methods to identify internal defects in various materials, which can be critical to ensure the safety and efficiency of technical structures. Despite the many flaw detection methods available, there is a need for innovative developments that can provide higher accuracy and efficiency. This study integrates different scientific methods and technologies. It opens up new perspectives in nondestructive testing for the detection of internal defects in various materials and structures. Its objective is to develop and implement nondestructive testing methods based on a neural network device to improve the accuracy of defect identification, as well as to build a neural network model and evaluate its effectiveness for the refinement of ultrasonic visualization of internal defects in solid materials. In this regard, the task to be solved is to create a reliable tool for accurate visualization of sizes, shapes, location and orientation of internal defects in various materials.

Materials and Methods. The technique of determining the geometric parameters of defects in materials through nondestructive testing is used. The approach combining modeling of ultrasonic wave propagation in acoustic medium and artificial neural network technologies is applied. This approach identifies nonlinear relationships between the geometry of defects and the amplitude-frequency and amplitude-time data obtained during signal analysis. Artificial neural networks are a model that can be trained on examples, which provides for an effective solution to problems that are difficult to express in traditional forms. The study uses the finite difference method in the time domain. It is applied to identify and visualize internal defects in materials using ultrasonic nondestructive testing and convolutional generative neural networks.

Results. A convolutional neural network has been developed to visualize internal defects using ultrasonic nondestructive testing techniques. This neural network successfully determines the size of defects, their location, shape and orientation with high accuracy and reliability.

Discussion and Conclusion. The authors highlight the key influence of defect size on the accuracy of ultrasonic imaging in various scenarios. The validation of the model for three different cases of defects with different mechanical parameters has shown that for successful visualization of defects, the wavelength of the ultrasonic pulse must be ten times smaller than the size of the defect. When analyzing the impact of defect size on the accuracy of the neural network, it is found that the visualization error increases for defects of smaller size. It has also been found that the relative speed of sound in materials has a greater effect on the accuracy of the method than the relative density of the material. Based on the results

obtained by the authors, it can be argued that the developed methods and technical solutions are of great importance for future research in the field of flaw detection. They have significant potential for scientific and practical applications.

Keywords: ultrasonic nondestructive testing, defects, ultrasonic response, convolutional neural networks

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Sobol BV, Soloviev AN, Vasiliev PV, Lyapin AA. Modeling of Ultrasonic Flaw Detection Processes in the Task of Searching and Visualizing Internal Defects in Assemblies and Structures. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):433–450. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-433-450

Введение. Обратные задачи в рамках научного исследования — это такие задачи, в которых осуществляется анализ последствий некоторых явлений или процессов с целью формулирования гипотез и выводов относительно их причинности. Обратные задачи встречаются в различных областях научных исследований, особенно в случаях, когда имеются большие объемы экспериментальных данных, позволяющие выявить характеристики и особенности процесса, который породил эти данные. Таким образом, обратные задачи предоставляют ученым возможность определить параметры процессов, недоступных при непосредственном наблюдении.

В настоящее время существует установившаяся методология решения обратных задач, которая основывается на анализе реакции системы на определенные входные воздействия. Современные подходы к решению обратных задач подразделяют их на различные категории, что облегчает их формализацию и адаптацию в зависимости от конкретной ситуации.

В машиностроении широко применяется методика решения обратных задач для диагностики механических систем. Изучение динамической реакции таких систем, включая анализ переходных характеристик, позволяет получить детальную и точную информацию о состоянии системы, что, в свою очередь, дает возможность определить ее производительность и качество.

В области диагностики конструкций и изделий растет потребность в оценке текущего состояния технических систем с целью выявления и устранения потенциальных опасностей, которые могут привести к производственным убыткам или несчастным случаям. Такие оценки могут быть даны лишь высококвалифицированными специалистами в области реинжиниринга.

С учетом этих аспектов была поставлена задача разработать и в дальнейшем оценить возможности применения нейросетевой модели для решения прикладных проблем ультразвуковой визуализации внутренних дефектов в твердых телах для различных материалов.

Существует большое количество научных работ, посвященных данной теме. Так, в [1] авторы сфокусировали свое внимание на анализе композитных материалов, содержащих дефекты. Наличие дефектов в таких композитах может существенно влиять на их эксплуатационные характеристики и поэтому представляет особый интерес для исследователей. Для поиска дефектов каждый из исследуемых объектов подвергается ультразвуковому сканированию, в ходе которого фиксируются колебания и определяются их характеристики. Следующим этапом анализа является классификация полученных характеристик с использованием искусственных нейронных сетей. Этот метод позволяет получить изображение области дефекта с высокой точностью. Такая визуализация отражает как характер, так и степень распространения дефекта в исследуемом материале. Важно отметить, что данная методика обеспечивает четкую идентификацию зоны повреждения, а полученное изображение соответствует визуальным наблюдениям.

В работе [2] представлен метод акустической эмиссии в контексте оценки композитных материалов, представляющий собой перспективное направление исследований. Особое внимание уделяется идентификации акустических сигналов, связанных с микроструктурой волокон, в условиях высокого уровня шума и с использованием пленочных датчиков. Для исследований были подготовлены многослойные композиты на основе армированного стекловолокна, изготовленные различными методами. Эксперименты включали в себя нагружение композитных образцов в статических условиях, в то время как PVDF-пленка была установлена на их поверхности. Акустические сигналы были аккуратно записаны и после этого были классифицированы при помощи искусственной нейронной сети. Результаты данного исследования говорят о возможности при помощи нейронных сетей успешно классифицировать различные механизмы разрушения в композитных материалах.

В исследовании [3] сделан анализ инцидентов обрушения, произошедших при раскопках в слоях горных пород на гидроэлектростанции Вудунде в Китае. Его авторы представили усовершенствованную модель искусственной нейронной сети (ИНС) для прогнозирования вероятности и глубины таких обрушений. Однако следует сказать, что одиночный параметр не способен обеспечить абсолютной точности предсказания глубины обруше-

ний. В этом исследовании был предложен интегрированный метод интеллектуального прогнозирования, основанный на применении искусственных нейронных сетей. Для его разработки проведены аналитическое и статистическое исследования, что позволило определить шесть ключевых входных параметров: глубина покрытия, отношение основных и малых напряжений, индекс геологической силы, метод выемки грунта, сила поддержки и ориентация породы.

Модель ИНС была обучена с использованием данных, собранных в процессе раскопок на гидроэлектростанции Вудунде, среди них было 45 образцов для обучения и 6 тестовых образцов для верификации. Для оптимизации параметров ИНС, таких как структурные характеристики и начальные веса, был применен генетический алгоритм. После завершения этапа обучения обученная нейронная сеть была успешно применена для прогнозирования глубины обрушений на нескольких участках раскопок. Результаты прогнозов демонстрировали высокое соответствие данным, полученным в ходе наблюдений на этих участках.

В статье [4] представлен инновационный метод для детектирования дефектов в стержневых конструкциях. Он существенно отличается от других и состоит из двух этапов. Первый этап фокусируется на точной локализации дефекта в стержне. Для этого используется анализ частот и форм колебаний, связанных с исследуемым объектом. Результаты анализа форм колебаний играют решающую роль в решении задачи первого этапа. На втором этапе, после успешной локализации дефекта, создается аналитическая или конечно-элементная модель конструкции, учитывающая выявленные дефекты. С использованием этой модели проводится оценка степени повреждения стержневой конструкции. Применение данного метода проиллюстрировано на примере вычисления параметров дефекта в упругом консольном стержне. Этот расчет основан на данных экспериментальных наблюдений, полученных в конечно-элементном комплексе. Представленный алгоритм предоставляет новый инструмент для более точной и эффективной идентификации дефектов в стержневых конструкциях, что имеет большое значение для научных исследований и инженерной практики. Результаты моделирования, проведенного в рамках данного исследования, свидетельствуют о снижении ошибки прогнозирования осаждения. Это указывает на улучшение функциональной аппроксимации и, следовательно, на отличные обучающие характеристики этого метода, по сравнению с традиционными нейронными сетями с сигмоидными или другими функциями активации.

В исследовании [5] предлагается инновационный метод диагностики дефектов в механической коробке передач, основанный на анализе сигналов вибрации, полученных в ходе экспериментальных испытаний. Основное внимание уделяется раннему выявлению аномалий в работе зубчатых передач. Для эффективного анализа вибрационных сигналов используется обработка данных, ориентированная на частотно-временную область. Одним из ключевых методов является применение непрерывного вейвлет-преобразования, что позволяет извлечь статистически значимые характеристики из сигналов. С целью оптимизации процесса обработки сигналов внедряется метод выделения особенностей, который способствует определению наиболее важных параметров, что, в свою очередь, снижает вычислительную нагрузку и ускоряет процесс анализа. Для выбора оптимальных входных признаков и дальнейшего снижения вычислительной сложности исследования применяются генетические алгоритмы. Этот интеллектуальный подход способствует повышению эффективности процесса анализа данных. Следующим важным этапом в рамках исследования является оценка эффективности предлагаемого метода. Для этой цели использованы передовые технологии нейронных сетей обратного распространения. Полученные результаты и производительность классификаторов тщательно оценивались на разнообразных вибрационных сигналах, полученных в ходе экспериментальных испытаний при различных условиях работы механических зубчатых передач коробки передач.

Исследования систем неразрушающего контроля и поиска дефектов в твёрдых телах зачастую затрагивают область моделирования соответствующих процессов [6]. Основное внимание направлено на решение обратных геометрических задач, тесно связанных с теорией упругости, для их дальнейшего применения при анализе плоской прямоугольной области. Задача заключается в восстановлении характеристик круговых полостей и трещин.

Для эффективного решения обратных задач исследователи опираются на информацию, полученную о первых четырёх собственных резонансных частотах. Эти параметры представляют собой дополнительный набор данных, значительно обогащающий информацию о системе. Методика, применяемая для решения обратных задач, базируется на минимизации функционала невязки. Суть этой методики заключается в сведении к минимуму расхождения между измеренными входными данными и значениями, полученными в результате численного решения прямых задач. При этом предварительно задаются параметры дефектов в твёрдом теле.

Таким образом, исследования в области неразрушающего контроля дефектов в твёрдых телах ориентированы на разработку и применение математических методов и моделирования, что позволяет точно определять и анализировать дефекты, скрытые внутри материала. Эти исследования нашли применение в области безопасности и контроля качества технических систем. Авторы исследуют возможности применения нейросетевых технологий в решении обратных задач механики, в частности задачи двумерной визуализации

внутренних дефектов. Данные методы получили широкое распространение в медицине, гражданской инженерии, неразрушающем контроле и других областях.

В работе [7] предложена система для выявления трещин в металлических конструкциях и определения их глубины на основе анализа двухмерных изображений. Основной целью данной работы было создание доступной и удобной системы контроля, более экономически выгодной альтернативы дорогостоящим измерительным устройствам. В рамках данного исследования была разработана специфическая стратегия обучения, а также рассмотрено несколько архитектур нейронных сетей, способствующих более точному выявлению трещин и оценке их глубины.

Процесс обучения нейронной сети включал в себя предоставление сети характеристик двухмерных профилей трещин, а также данных о максимальной глубине залегания трещины, измеренной с использованием лазерного микроскопа. Это позволило создать модель, которая способна точно определять глубину дефектов в материале. Следует отметить, что средняя ошибка в работе данной нейронной сети составляет всего около 18 % на тестовых образцах. Этот результат значительно превосходит итоги предыдущих работ, которые основывались на разнообразных стратегиях обучения и методиках анализа. Таким образом, данное исследование значительно повысило качество определения глубины трещин в металлических конструкциях. Его ценность заключается в разработке новых стратегии обучения и инструмента для более точной оценки глубины трещин.

В исследовании [8] подчеркивается важность наличия размеченных данных, содержащих изображения, на которых отмечены дефекты. Одним из новейших предложений в данной области является представленная модель глубокого трансферного обучения, предназначенная для извлечения характерных признаков внутренних дефектов на рентгеновских изображениях, полученных в результате инспекции авиационных композитных материалов. Эта модель представляет собой инструмент для автоматического анализа таких изображений, который позволяет оптимизировать процесс обнаружения дефектов и повысить эффективность неразрушающего контроля.

В ходе исследования была произведена проверка эффективности предложенной модели на задаче обнаружения дефектов-включений на рентгеновских изображениях. Анализ результатов экспериментов показал, что данная модель способна достигать высокой точности (96 % по метрике F1). Такие обнадеживающие результаты свидетельствуют о потенциале данного подхода и его способности давать удовлетворительные результаты в задачах по идентификации дефектов. Это открывает новые горизонты в области неразрушающего контроля и позволяет более эффективно обеспечивать безопасность и надежность композитных материалов в авиационной индустрии.

В работе [9] показан метод, который предлагает реконструкцию и визуализацию внутренних аномалий в форме трехмерных репрезентаций. Этот подход использует экономически и временно выгодную методику, известную как импульсная термография. В данном контексте представлен новаторский метод, который способен быстро и точно оценить как глубину, так и толщину внутренних аномалий с помощью односторонней инспекции. Целесообразность и эффективность данного метода успешно демонстрировались в ходе исследования композитных и стальных образцов, содержащих полузакрытые воздушные зазоры. Результаты исследования подтвердили, что при предложенном методе ошибка в оценке общего объема трехмерных аномалий составляет всего лишь 10 % для композитных образцов. Таким образом, данный инновационный метод предоставляет новые возможности для неразрушающего контроля и визуализации внутренних дефектов в различных материалах и образцах, обеспечивая при этом высокую точность и экономическую эффективность.

В работе [10] рассмотрены фундаментальные факторы, приводящие к отказам в работе твердотопливных ракетных двигателей. Один из ключевых аспектов, оказывающих критическое воздействие на целостность двигателей, заключается в явлении отслаивания на границе раздела между ракетным топливом, изоляцией и защитным слоем. Современные методы диагностики и оценки структурной целостности ракетных двигателей, как правило, ограничиваются визуальным осмотром и анализом их компонентов. Данный подход имеет свои ограничения и требует совершенствования. В этом контексте представлен новаторский алгоритм, предназначенный для выявления поверхностных дефектов обшивки, способных нарушить связь между твердым топливом и изоляцией ракетного двигателя. Для оптимизации работы нейронной сети проведен ряд тестов, в которых менялись различные параметры сети. Эти исследования позволяют достичь точности классификации в 99,08 % для класса исправных элементов, 90,66 % — для класса посторонних объектов и 99,48 % — для класса, связанного с дефектами. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности предложенного метода и его потенциале для применения в области диагностики твердотопливных ракетных двигателей.

Исследование, проведенное и опубликованное автором в статье [11], нацелено на изучение потенциала методов глубокого обучения в контексте электромагнитной инверсии. Суть данного подхода заключается в применении глубоких нейронных сетей, основанных на сверточной архитектуре, для анализа и обработки данных, полученных в рамках данной задачи. Важным аспектом этого исследования является обучение с использованием обширных наборов синтетических данных, полученных при помощи трехмерного моделирования. Глубокие

нейронные сети здесь обучаются на множестве синтетических данных, представляющих собой информацию о распределении электромагнитных полей внутри объектов и сред. Эти данные предоставляют ценную информацию об их свойствах и составах, что делает метод электромагнитной инверсии более точным и эффективным. Эффективность предложенного метода была успешно продемонстрирована на различных моделях, которые имеют высокое практическое значение. К примеру, при мониторинге электромагнитного поля в области скопления углекислого газа, находящегося под землей, инверсионный метод позволяет анализировать и контролировать данное поле с использованием источника на поверхности.

Ранее авторы представленного сегодня исследования уже рассматривали задачи, сочетающие современные методы глубокого машинного обучения и хорошо зарекомендовавшие себя классические подходы к идентификации дефектов [12–14]. В нынешней же работе акцент сделан на нейросетевую модель, которая эффективно выполняет двумерную акустическую визуализацию внутренних аномалий. Этот проект выведет на новый уровень область неразрушающего ультразвукового контроля, предоставив возможность провести системный анализ с использованием численных экспериментов.

Цель представленной сегодня исследования — разработка и оценка эффективности нейросетевой модели для улучшения ультразвуковой визуализации внутренних дефектов в твердых материалах. Для выявления нелинейных связей между геометрическими характеристиками дефектов и сигналами ультразвукового контроля авторы предлагают использовать методику, основанную на решении обратной задачи механики твердого тела и применении искусственных нейронных сетей. Основная задача при этом заключается в создании надежного инструмента для точной визуализации размеров, форм, местоположения и ориентации внутренних дефектов в различных материалах. Численные эксперименты аппроксимируют процесс ультразвукового зондирования образцов, в которых присутствуют внутренние дефекты с различными геометрическими формами и механическими характеристиками. Эти эксперименты служат исходными данными для обучения нейронной сети и последующей проверки ее на правильность функционирования и точность. Таким образом, можно утверждать, что данное исследование охватывает широкий спектр научных методов и технологий, включая разработку нейронных сетей, моделирование ультразвуковых волн и анализ акустических данных.

Материалы и методы. В данной работе применяются многослойные искусственные нейронные сети прямого распространения (feed-forward neural networks, FFNN) и свёрточные ИНС (convolutional neural network, CNN). Для определения наиболее рациональной архитектуры сетей применяется аналитическое программное обеспечение. ИНС обучаются алгоритмами RProp (устойчивое обратное распространение) и Adam (метод адаптивной оценки моментов).

Алгоритм RProp основан на методе градиентного спуска. В отличие от стандартного алгоритма обратного распространения ошибки, RProp для подстройки весовых коэффициентов использует только знаки частных производных. Алгоритм использует обучение по эпохам, а коррекция весов происходит после обработки всего объема обучающей выборки. Весовые значения обновляются следующим образом:

$$\Delta_{ij}^{(t)} = \begin{cases} \eta^{+}\Delta_{ij}^{(t)}, \dfrac{\partial E^{(t)}}{\partial \omega_{ij}} \dfrac{\partial E^{(t-1)}}{\partial \omega_{ij}} > 0 \\ \eta^{-}\Delta_{ij}^{(t)}, \dfrac{\partial E^{(t)}}{\partial \omega_{ij}} \dfrac{\partial E^{(t-1)}}{\partial \omega_{ij}} < 0 \end{cases}, \quad \Delta\omega_{ij}^{(t)} = \begin{cases} -\Delta_{ij}^{(t)}, \dfrac{\partial E^{(t)}}{\partial \omega_{ij}} > 0 \\ +\Delta_{ij}^{(t)}, \dfrac{\partial E^{(t)}}{\partial \omega_{ij}} < 0 \\ 0, \dfrac{\partial E^{(t)}}{\partial \omega_{ij}} = 0 \end{cases}, \quad 0 < \eta^{-} < 1 < \eta^{+},$$

после чего происходит подстройка весов: $\omega_{ij}^{(t+1)} = \omega_{ij}^{(t)} + \Delta\omega_{ij}^{(t)}$.

Adam (метод адаптивной оценки моментов) использует сгруппированные средние как градиентов, так и вторых моментов градиентов. Если установлены параметры $w^{(t)}$, а функция потерь $\mathcal{L}^{(t)}$, где t отражает индекс текущей итерации, пересчёт параметра алгоритмом задаётся следующим образом:

$$m_{\omega}^{(t+1)} \leftarrow \beta_1 m_{\omega}^{(t)} + (1-\beta_1)\nabla_{\omega} \mathrm{L}^{(t)}$$

$$v_{\omega}^{(t+1)} \leftarrow \beta_2 v_{\omega}^{(t)} + (1-\beta_2)\left(\nabla_{\omega} \mathrm{L}^{(t)}\right)^2,$$

$$\hat{m}_{\omega} = \frac{m_{\omega}^{(t+1)}}{1-\beta_1^{(t+1)}}, \; \hat{v}_{\omega} = \frac{v_{\omega}^{(t+1)}}{1-\beta_2^{(t+1)}}, \omega^{(t+1)} \leftarrow \omega^{(t)} - \eta \frac{\hat{m}_{\omega}}{\sqrt{\hat{v}_{\omega}} + \varepsilon}$$

где ε является малой добавкой, используемой для предотвращения деления на 0, а β_1 и β_2 являются коэффициентами забывания для градиентов и вторых моментов градиентов соответственно; η — базовая скорость обучения. Возведение в квадрат и квадратный корень вычисляются поэлементно.

Изображения, обрабатываемые свёрточной ИНС, можно представить как тензор размера:

$$\dim(I) = (\hat{h}, \hat{\omega}, d),$$

где $\hat{h}$ и $\hat{w}$ — размеры двумерного изображения; d — количество каналов изображения. Ядро свёртки K имеет следующие размеры:

$$\dim(K) = (f, f, d),$$

где f — сторона квадратного фильтра свёртки.

Операцию свёртки можно определить следующим образом. Объектом свёртки является двумерное изображение I. Ядро свертки K имеет размеры $h \times w$. Результатом свертки будет:

$$(I * K)_{xy} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{\omega} K_{ij} \times I_{x+i-1,y+j-1}.$$

На этом операторе строится сверточный слой, который состоит из определенного набора ядер $\vec{K}$, соответствующих им смещений :

$$conv(I, K)_{xy} = \sigma\left(b + \sum_{i=1}^{h}\sum_{j+1}^{\omega}\sum_{k=1}^{d} K_{ijk} \times I_{x+i-1,y+j-1}\right),$$

где d — индекс канала изображения; b — составляющая смещения; σ — активационная функция сверточного слоя.

Обучаемыми параметрами данного слоя являются фильтр K и смещение b.

В области машинного обучения существует несколько техник регуляризации. Для предотвращения переобучения сложных моделей ИНС с большим количеством параметров применяется метод регуляризации Тихонова (*ridge regression,* или *L2)*, в машинном обучении также называемый *weight decay*. Коэффициентом регуляризации является λ, который управляет минимизацией нормы относительно минимизации потерь на обучающем наборе данных. Таким образом, для каждого веса *w* происходит прибавление к целевой функции $\mathrm{L}(\vec{y}, \vec{y})$ слагаемого: $\frac{\lambda}{2}\|\vec{\omega}\|^2 = \frac{\lambda}{2}\sum_{i=1}^{W}\omega_i^2$. В рамках применяемого фреймворка *Keras* регуляризация применяется для каждого свёрточного слоя ИНС-модели.

Начальная инициализация весов проводится методом *Xavier*. Во время начальной установки весовых значений применяется вероятностное распределение, как равномерное, так и нормальное с дисперсией $Var(W) = 2/(n_{in} + n_{out})$, где n_{in} и n_{out} — количества нейронов в предыдущем и последующем слоях соответственно.

Дисперсия выходных значений линейного нейрона (без смещений) имеет вид:

$$V_{ar}\left(\sum_{i=1}^{n_{in}}\omega_i x_i\right) = \sum_{i=1}^{n_{in}} V_{ar}(W)V_{ar}(X) = n_{in}V_{ar}(W)V_{ar}(W)V_{ar}(X).$$

Подразумевается, что веса и входные значения не коррелируют и имеют нулевое матожидание. Из этого получаем дисперсию вероятностного распределения, на основе которого проходит первичная инициализация весов, и обеспечивающую сохранение дисперсии входных данных после прохождения через слой.

В данной работе слои батч-нормализации (*Ioffe* и *Szegedy*) активно применяются в большинстве разработанных ИНС-моделей с использованием фреймворка *Keras*. Метод осуществляет нормализацию входных данных таким образом, что их матожидание равно нулю, а дисперсия — единице. При этом нормализация выполняется на каждом слое для каждого пакета данных:

$$\mathrm{B}x_1, \ldots, x_m, \mu_{\mathrm{B}} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_i, \sigma_B^2 = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(x_i - \mu_B)^2.$$

На основе этих характеристик преобразуется активационная функция:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \varepsilon}}, \varepsilon > 0, y_i = \gamma\hat{x}_i + \beta,$$

где β и γ — параметры, которые возможно оптимизировать методом градиентного спуска на основе обучающего набора.

Слои *Dropout* применяются в ИНС-моделях в задаче идентификации дефектов на дорожном покрытии, которые служат для предотвращения переобучения. При использовании данного средства регуляризации предотвращается взаимоадаптация нейронов на этапе обучения ИНС. Данный метод блокирует (отключает) нейроны во время обучения с вероятностью. Учитывая, что $h(x)=xW+b$ — линейная проекция входного d_i — мерного вектора *x* на d_h — мерное пространство выходных значений и $a(h)$ — активационная функция, применение *Dropout* к данной проекции на этапе обучения можно представить как модифицированную функцию активации

$$f(h)=D\odot a(h),$$

где $D=(X_1,...,X_{dh})$ — d_h-мерный вектор случайных величин X_i, распределенных по закону Бернулли. X_i, имеет следующее распределение вероятностей:

$$f(k,p)=\begin{cases} p,\ k=1 \\ 1-p,\ k=0 \end{cases},$$

где *k* — все возможные выходные значения.

Применение *Dropout* к *i*-му нейрону выглядит следующим образом:

$$O_i = X_i a\left(\sum_{k=1}^{d_i}\omega_k x_k + b\right) = \begin{cases} a\left(\sum_{k=1}^{d_i}\omega_k + b\right), X_i = 1 \\ 0,\quad X_i = 0 \end{cases},$$

где $P(Xi=0)=p$.

Нейронные сети, которые описаны в данной работе, принадлежат к сетям прямого распространения. Входная информация составляется из данных численных экспериментов и, проходя через сеть, формирует на выходе значения, которые оцениваются метрикой, и на основе этих данных происходит корректировка внутренних значений весов нейронной сети. Применяется итерационный подход, который обеспечивает достижение удовлетворительного уровня точности работы нейросети.

Методология идентификации дефектов. В данной работе рассматривается методика определения геометрических параметров дефектов на основе данных, полученных в процессе воздействия на исследуемый объект. Эта задача входит в область неразрушающего контроля свойств и параметров объектов, ориентированных на обратную задачу механики твердого тела. Для решения данной задачи применяется системный подход с ключевой ролью искусственных нейронных сетей. Суть данного подхода заключается в выявлении нелинейных зависимостей между различными геометрическими характеристиками дефектов, такими как их размеры, глубина расположения, угол поворота и тип, и данными, полученными в процессе анализа.

В качестве таких данных могут выступать амплитудно-частотные и амплитудно-временные характеристики сигналов, полученных в ответ на воздействие. Этот метод позволяет эффективно выявлять и оценивать параметры дефектов и обеспечивает точное и надежное контролирование состояния объектов. Искусственные нейронные сети — это вычислительная модель, используемая в машинном обучении, информатике и других исследовательских дисциплинах, которая основана на большом наборе связанных простых единиц, называемых искусственными нейронами, подобных аксонам в биологическом мозге. Связи между нейронами передают сигнал активации разной величины. Если объединённые входящие сигналы достаточно сильны, нейрон активируется и сигнал перемещается к другим нейронам, связанным с ним. Такие системы можно обучить с помощью заранее приготовленных примеров, а не явно программировать. Этот метод дает значительное преимущество в тех областях, где решения и функции трудно выразить в традиционных формах. Нейронные сети, а также другие методы машинного обучения используются для решения различных задач, которые трудно решить с помощью традиционного программирования на основе таких правил, как компьютерное зрение и распознавание речи. ИНС обычно используются для моделирования сложных связей между входами и выходами с целью нахождения закономерностей в экспериментальных или иных данных (data mining) [15, 16].

Разделение технической задачи на ряд подзадач, рассматриваемых отдельно друг от друга и решаемых с применением существующих средств и подходов, позволяет говорить о системном подходе к рассматриваемой задаче идентификации. Сочетание этих задач образует целую систему, которая решает производственные проблемы комплексно.

Предлагается инновационный метод идентификации и визуализации внутренних дефектов с применением ультразвукового неразрушающего контроля (УЗНК) и сверточной генеративной нейросетевой архитектуры. Сигнал УЗНК, зарегистрированный на поверхности объекта контроля, пропускается через обученную нейронную сеть. В результате обработки сетью генерируется высококачественное изображение, представляющее собой тепловую

карту, демонстрирующую внутренний дефект объекта. Для иллюстрации эффективности предложенного метода и его перспектив в промышленных приложениях в качестве объекта исследования была выбрана металлическая стальная полоса. Внутри этой полосы предполагается наличие дефектов, которые могут имитировать как полости, так и жесткие включения. Также учитывается и возможность отсутствия дефектов. Следует отметить, что характеристики дефектов, такие как форма, размер и ориентация, могут значительно варьироваться, что представляет дополнительную сложность для задачи визуализации. Методология данного подхода состоит в проведении серии численных экспериментов, на основе результатов которых обучается глубокая нейронная сеть. Для формирования обучающего набора данных выполняется систематическое изменение механических параметров, геометрических характеристик, а также положения внутренних дефектов. Особое внимание уделяется моделированию процесса распространения акустической ультразвуковой волны внутри материала.

Этот инновационный подход к идентификации и визуализации внутренних дефектов предоставляет возможность более точного и эффективного контроля за качеством материалов и изделий в различных отраслях промышленности. Его применение может способствовать повышению надежности и безопасности конечных продуктов, что является важным аспектом в современной индустрии. На основе собранных данных строится и обучается оптимальная структура нейросетевой модели. В результате нейросетевая модель может реконструировать форму, размер и положение дефекта из необработанного ультразвукового сигнала, снятого на поверхности полосы. На рис. 1 показана блок-схема исследования.

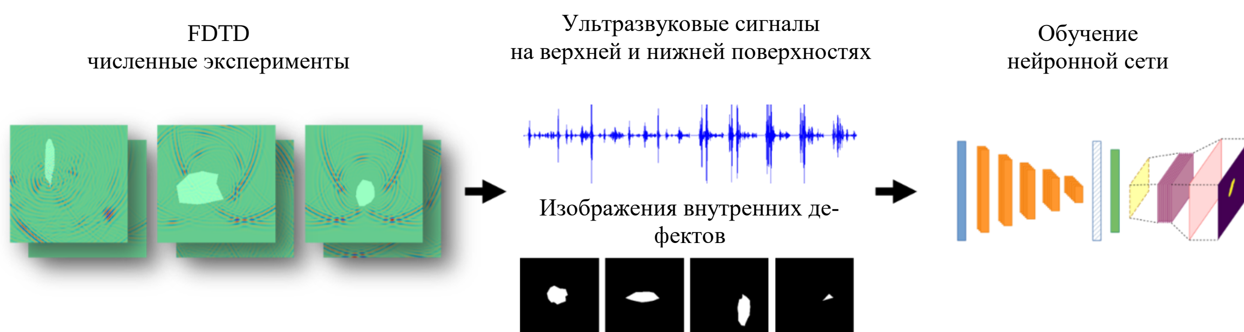


Рис. 1. Схема проведения серии численных экспериментов с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD). Фрагмент полосы в области дефекта и распространение ультразвуковой волны (слева). Построение набора данных, состоящего из ультразвуковых сигналов и соответствующих бинарных изображений дефекта (в центре). Построение архитектуры и обучение нейронной модели (справа)

Метод конечных разностей во временной области. Он был предложен Кейном Йи [17]. Решение дифференциальных уравнений в контексте моделирования сред с дисперсными и нелинейными свойствами выявляет уникальный класс методов — сеточные методы. Эти методы нашли широкое применение в разнообразных областях, начиная с геофизических задач и заканчивая задачами в оптическом диапазоне.

Один из эффективных методов исследования физических явлений в различных средах — метод конечных разностей во временной области. Он представляет собой ценный инструмент при решении акустических задач, а также может быть успешно применен в упругих средах.

Основным уравнением данной акустической модели в плоской постановке является:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -k\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}\right) \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}.$$

Происходит дискретизация скорости и акустического давления частиц моделируемого объекта в пространственной сетке. Путем последовательных вычислений значений этих параметров можно анализировать распространение звукового поля в течение определенного временного интервала. Этот метод обеспечивает возможность изучения различных физических процессов и явлений, предоставляя ценные данные о поведении среды с разнообразными характеристиками.

Метод конечных разностей во временной области хоть и был изначально разработан для решения акустических задач, обладает широким спектром применения и в других областях физики. В частности, он находит свое применение при моделировании распространения звука в различных средах, таких как воздух или жидкость. Такая универсальность метода делает его неотъемлемой частью научных и инженерных исследований в области физики и акустики.

Для проверки эффективности выбранной методики была разработана эталонная модель в расчетном пакете COMSOL, предназначенная для анализа распространения акустической ультразвуковой волны. В рамках данного исследования были использованы два основных численных метода: метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (FDTD). Модель представляет собой структуру в форме квадрата, изготовленную из стали, с присутствием внутреннего отверстия.

Значительные отличия в форме полученных сигналов объясняются различными методами задания источника ультразвуковых колебаний. В случае применения метода конечных элементов точки источника располагаются на окружности внутреннего отверстия, в то время как в методе конечных разностей во временной области источник представлен точкой, находящейся в узле сетки.

Однако следует отметить, что ограниченные размеры расчетной сетки не позволяют моделировать распространение акустических волн за пределами данной области. Для учета этого факта применяются специальные граничные условия, такие как поглощающие слои Мура или PML (Perfect Matched Layers). Эти граничные условия значительно уменьшают отражение акустических волн от границы расчетной области, что позволяет симулировать прохождение ультразвуковой волны внутрь структуры с высокой степенью точности.

Модель неразрушающего контроля. В качестве модели неразрушающего контроля используется стальная полоса, содержащая дефект. Её размер — 100х15 мм. Поглощающие слои установлены на левой и правой границах полосы. Верхняя и нижняя части прутка связаны с областями, которым заданы механические параметры воздуха. Дефекты представлены в виде выпуклых многоугольников. Разнообразие внутренних дефектов задается путем изменения количества сторон многоугольника, их длины, расстояния между вершинами и центром дефекта. Физические параметры дефектов изменяются относительно толщины полосы. Положение дефекта варьируется от 0,3 до 0,7, длина сторон — от 0,1 до 0,5. Область ввода импульса датчика расположена на верхней поверхности полосы. Колебания считываются как на верхней, так и на нижней поверхности. Таким образом, моделируется эхо- и теневой методы неразрушающего ультразвукового контроля.

В данном исследовании анализируется входной сигнал, представленный как фиксированное множество дискретных значений, зависящих от времени проведения эксперимента. Экспериментальное время было строго определено с учетом требования, чтобы зондирующий импульс, выпущенный на инициирующей стороне и направленный на противоположную поверхность тестируемого бруса, имел достаточное время для пройденного расстояния и возврата в точку источника.

Следует отметить, что использованная частота зондирующего импульса составляет 10 МГц, что обеспечивает высокую разрешающую способность экспериментальной системы. Это позволяет более точно изучать свойства бруса и его структурные характеристики, основываясь на анализе отраженного сигнала.

На рис. 2 показана схема проводимого численного эксперимента. Дефект расположен внутри стальной полосы. Источник ультразвукового сигнала обозначен красным цветом, точки считывания сигнала — зелеными метками. Сигнал также считывается в точках его излучения.

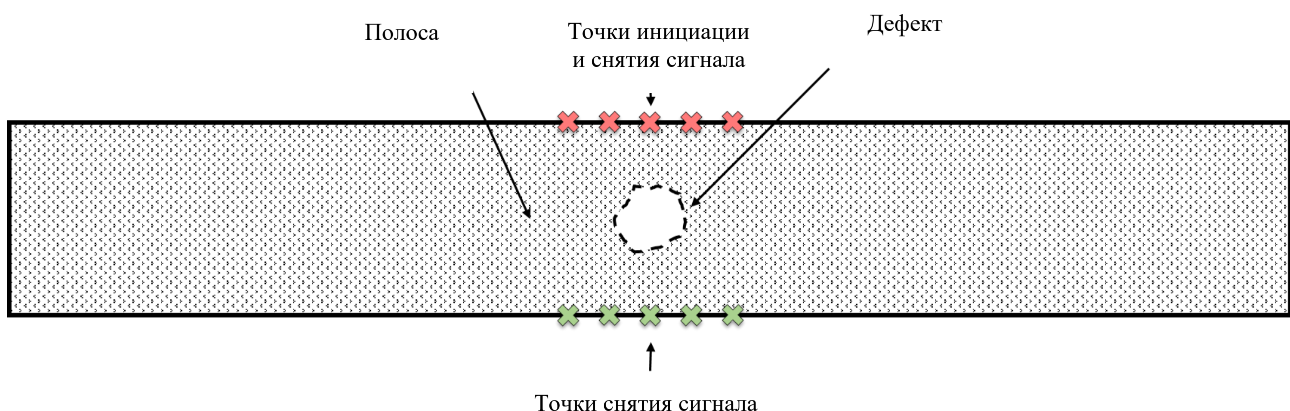


Рис. 2. Схема численного эксперимента

На рис. 3 представлены колебания ультразвуковых сигналов, полученных в указанных точках на верхней поверхности полосы (справа) и на нижней поверхности полосы (слева). Это имитирует расположение датчиков на противоположных поверхностях объекта контроля, данная модель предполагает, что датчики могут перемещаться вдоль полосы в поисках дефекта синхронно.

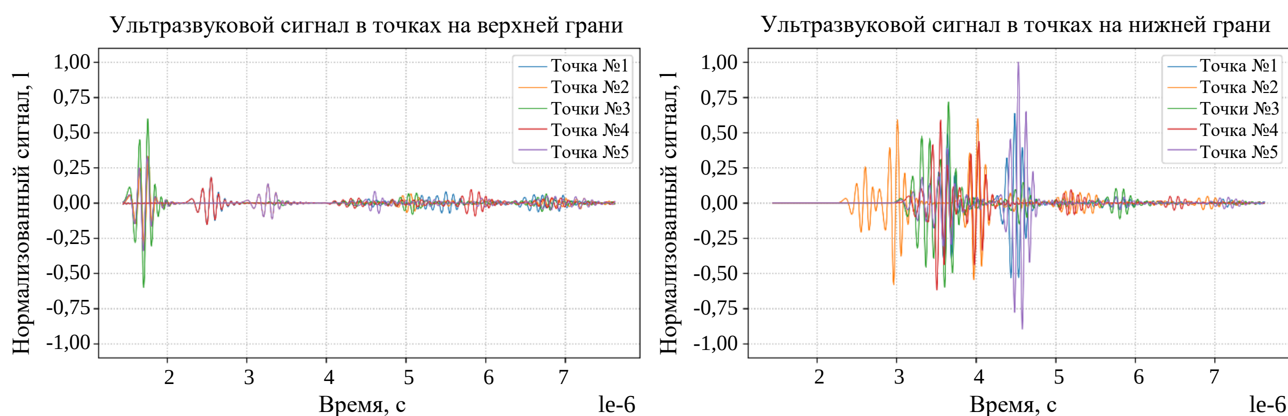


Рис. 3. Ультразвуковые сигналы на верхней и нижней поверхностях полосы, полученные в результате численного моделирования

Модель нейронной сети. Сверточные нейронные сети (CNN) — это специальный нейросетевой инструмент для обработки дискретных данных (двумерные изображения, одномерные сигналы) [18]. В настоящее время это один из наиболее быстро развивающихся и перспективных инструментов глубокого обучения [19–21].

Сверточные нейронные сети эффективно применяются в различных областях, включая анализ видео и обработку временных рядов. Они позволяют обрабатывать временные ряды как одномерные массивы данных и выделять важные признаки в них с помощью операции свертки.

Для визуализации дефектов в объектах контроля используется архитектура модели, включающая слои одномерной свертки (Conv1D) и слои понижающей дискретизации (MaxPooling), для извлечения признаков из ультразвуковых сигналов. Затем данные передаются в полносвязный слой для анализа в контексте задачи визуализации дефектов. Вторая часть сети генерирует изображения, отображающие характеристики дефектов.

Для создания окончательного изображения дефекта данные из полносвязного слоя обрабатываются и подаются на двухмерный слой. Затем с использованием обучаемых сверточных слоев (Conv2D Transpose) формируется финальное изображение.

На рис. 4 показана архитектура сверточной нейронной сети с указанием размеров входных данных и количества сверточных фильтров для каждого слоя.

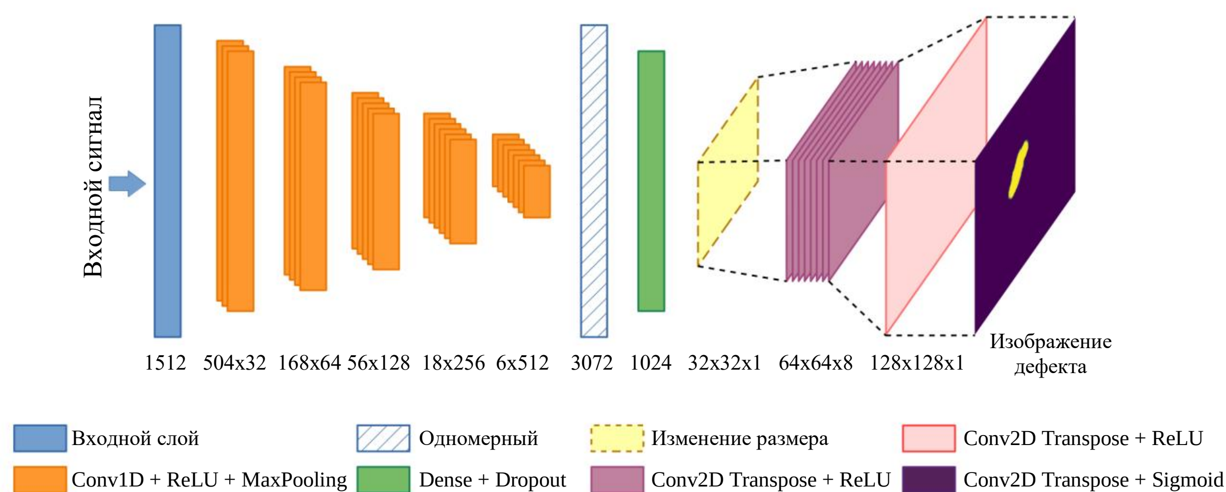


Рис. 4. Структура модели сверточной нейронной сети

Обучение и валидация модели. В рамках комплекса численных экспериментов были рассмотрены три случая. В случае *А* дефект моделирует полость, а параметры материала дефекта соответствуют параметрам воздуха. В

случае *B* дефект моделирует жесткое включение и параметры дефекта имеют параметры материала, который является более жестким, чем сталь. В данном случае это карбид вольфрама. В случае *C* варьируются механические параметры дефектов, которые соответствуют параметрам газов, жидкостей и твердых материалов.

Для случаев *A* и *B* было решено в общей сложности 50 000 задач для различных геометрических параметров дефекта. Из них 35 000 экземпляров используются для обучения, 10 000 — для тестирования и 5 000 — для валидации. В случае *C* решается 60 000 задач с одинаковым процентным соотношением тестовых и валидационных образцов.

В процессе оценки производительности модели ключевыми метриками являются минимальная ошибка обучения и сокращение разрыва между ошибкой обучения и тестирования. Эффективность модели машинного обучения подвергается анализу с использованием различных методов регуляризации, таких как регуляризация Тихонова, также известная как L2-регуляризация. Инициализация весов, проводимая, например, методом Xavier, представляет собой значимый этап обучения нейронных сетей.

Одним из средств, применяемых для уменьшения внутреннего ковариационного сдвига и стабилизации обучения нейронных сетей, является метод пакетной нормализации. С целью повышения стабильности и обобщающей способности модели применяются разнообразные приемы регуляризации, такие как ранняя остановка и Dropout.

Необходимо отметить, что в данной исследовательской работе не применяется аугментация данных ввиду обширного объема обучающей выборки. Также не проводится балансировка набора данных, что, тем не менее, имеет свои преимущества в связи с нормальным распределением дефектов по размерам.

Следует подчеркнуть, что обучение нейронной сети представляет собой задачу оптимизации, где выбор соответствующей функции потерь играет важнейшую роль. Например, в задачах компьютерного зрения и семантической сегментации коэффициент схожести Жаккара может оказаться весьма значимым. В данной работе рассматривается применение коэффициента схожести Жаккара в контексте задачи обнаружения и сегментации объектов, что позволяет достичь более точных и устойчивых результатов при анализе изображений:

$$IoU = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{|A \cap B|}{|A| + |B| - |A \cap B|}.$$

В данном контексте функция потерь выражается как обратное значение коэффициента сходства Жаккара (1–IoU) и представляет собой метрику, которая оценивает различие между двумя экземплярами. Метрика Жаккара известна в области анализа данных и машинного обучения как индикатор пересечения и сходства множеств.

Для оценки эффективности модели нейронной сети в процессе валидации данная метрика применяется как один из критериев. Она позволяет определить степень соответствия между выходом модели и эталонными данными, что важно для анализа и улучшения работы нейронных сетей в задачах обработки информации:

$$F1 = \frac{2 \times IoU}{IoU + 1}.$$

В настоящем исследовании использован один из наиболее распространенных алгоритмов оптимизации, именуемый Adam. Для решения поставленных задач машинного обучения и обучения нейронных сетей применяются одни их наиболее признанных и широко используемых библиотек — TensorFlow и Keras. Эти программные продукты выступают в настоящее время как стандартные инструменты для создания и обучения нейронных моделей и включают в себя передовые технологии в данной области.

Для достижения высокой точности работы моделей было проведено обучение в течение 30 эпох в каждом из трех рассмотренных случаев: *A, B* и *C*.

Нейросетевой подход для решения обратных задач уже зарекомендовал себя с хорошей стороны [22–24]. С углублением в область машинного обучения и последующим развитием новых методологий открываются передовые инструменты для анализа данных и решения традиционных задач в механике и дефектоскопии. Одним из значительных научных достижений в данной сфере представляется сверточная нейронная сеть, созданная специально для решения проблемы визуализации внутренних дефектов с использованием методов ультразвукового неразрушающего контроля. Примечательной характеристикой данной модели является её относительно небольшой объем, составляющий 37,2 миллиона параметров. Этот факт обеспечивает высокую эффективность процесса обучения и расширяет область её применения в разнообразных смежных областях. Для более эффективного моделирования распространения ультразвуковых волн в данном исследовании был выбран метод конечных разностей во временной области. Этот выбор метода существенно увеличил скорость вычислений по сравнению с предыдущими подходами, применяемыми в ранее проведенных научных исследованиях.

Результаты исследования. В данной работе рассматривались три состояния внутреннего дефекта. В случае *A* дефект моделирует полость, при этом параметры среды в области дефекта соответствуют параметрам воздуха. В случае *B* дефект моделирует жесткое включение, при этом параметры среды имеют параметры более жесткого

материала, чем материал полосы. В данном случае это карбид вольфрама. В случае *C* проводится вариация механических параметров дефекта, которые соответствуют параметрам газов, жидкостей и твердых материалов.

Результаты этого исследования, представленные на рис. 5, демонстрируют эффективность нейронных сетей в анализе и восстановлении информации о дефектах. Визуализированные фрагменты полосы в области дефекта отображаются на графике. Реальный дефект обозначен сплошной черной линией, тогда как форма и положение дефекта, предсказанные нейронной сетью, представлены пунктирной красной линией. Анализ рисунка позволяет утверждать, что нейросетевая модель способна восстановить размер дефекта, точно определить его местоположение, частично воспроизвести его форму и даже установить ориентацию. Эти результаты подтверждают потенциал нейронных сетей в решении задач обработки и анализа изображений с применением высокой точности и надежности.

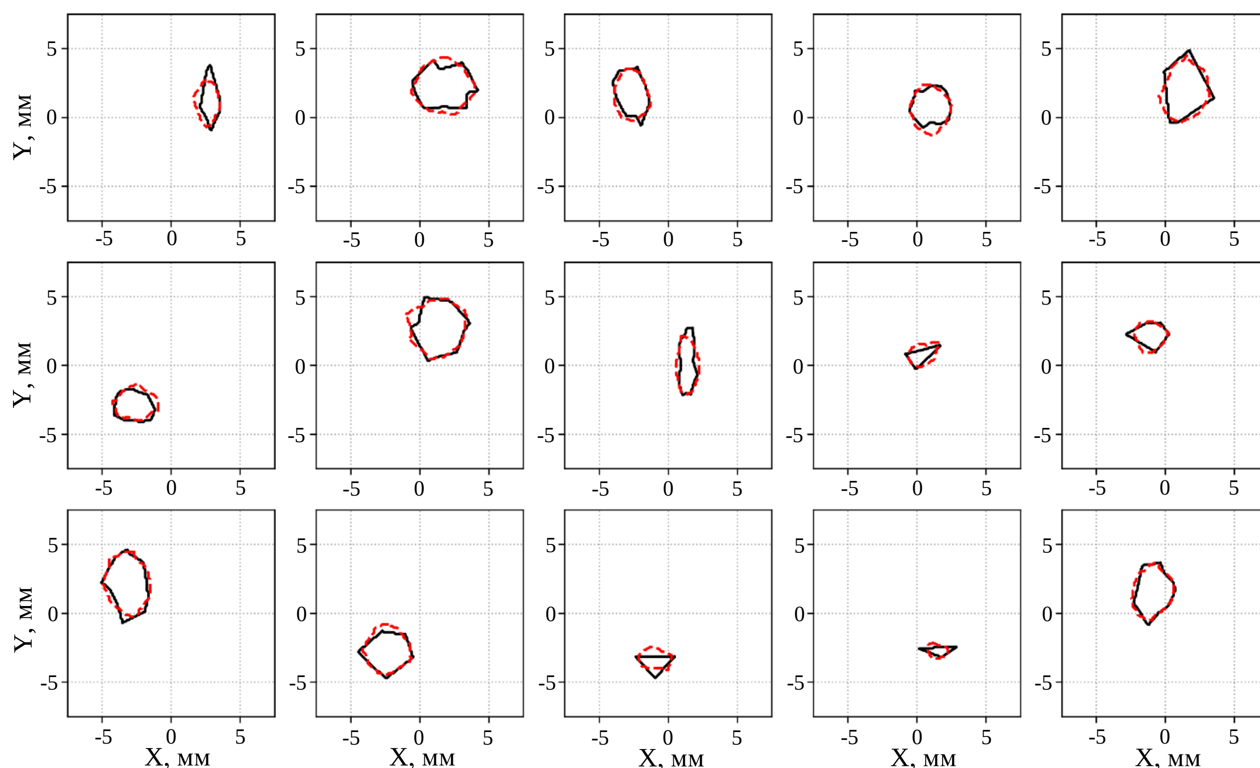


Рис. 5. Результаты визуализации дефектов. Реальный дефект выделен черным цветом.
Прогноз нейронной сети выделен красным цветом.

Валидация проводилась для каждого из случаев. Для оценки общей эффективности модели использована метрика F1. В целом точность предложенного метода находится на высоком уровне. Среднее значение F1 для всего валидационного набора составляет 92 % для случая *A*, 90 % — для случая *B* и 85 % — для случая *C*.

На рис. 6 показана зависимость точности визуализации дефекта от его размера. Размер дефекта — это максимальное расстояние между вершинами многоугольника, имитирующего дефект. Полученные данные показывают, что для успешной визуализации дефектов длина волны ультразвукового импульса должна быть в десятки раз меньше размера дефекта. На рисунке также показано влияние несбалансированного набора данных на точность работы нейронной сети. Для дефектов наибольшего размера ошибка визуализации увеличивается.

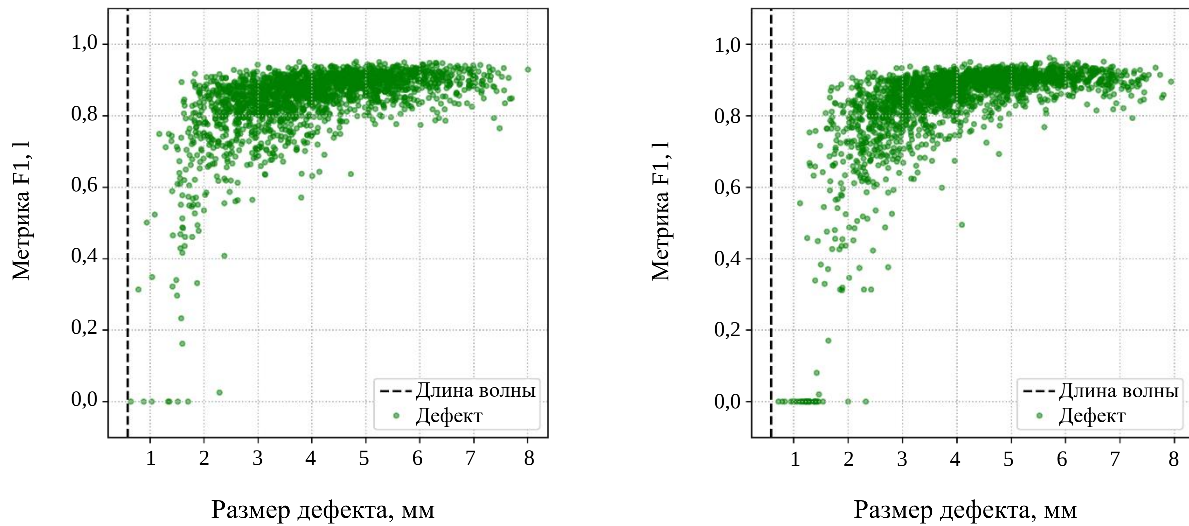


Рис. 6. Зависимость точности визуализации дефектов от их размера для случаев *A* (слева) и *B* (справа). Черной штриховой линией показана длина волны зондирующего ультразвукового импульса

Авторы также проанализировали влияние механических параметров дефекта на точность их визуализации. Для каждой нейронной сети из случаев *A*, *B* и *C* проведена валидация на наборе данных с различными механическими параметрами дефектов. Данное исследование показывает, насколько хорошо обученные нейросетевые модели способны проводить визуализацию различных типов дефектов, в том числе дефектов, которые отсутствовали в обучающих наборах. Для простоты восприятия параметры плотности материала и скорости звука в материалах представлены как относительные:

$$\rho_{relative} = \frac{\rho_{steel} - \rho_{defect}}{\rho_{steel}}, C_{relative} = \frac{C_{steel} - C_{defect}}{C_{steel}}.$$

На рис. 7 показано, как точно нейросетевые модели *A*, *B* и *C* проводят визуализацию дефектов для широкого спектра параметров. В случае, когда нейронная сеть обучена только на наборе данных *A*, когда дефект моделирует полость, приемлемая точность достигается только для дефектов с $C_{relative} > 0,7$. В случае *B*, когда дефект моделирует жесткое включение, точность работы нейронной сети существенно ухудшается при отклонении значения C_{defect} от заданного в эксперименте. В случае *C*, когда нейронная сеть обучалась на наборе данных с различными параметрами дефектов, результаты работы устойчивы на всей области изменения параметров. Исключением являются дефекты со значением $C_{relative} \to 0.$ В этих случаях скорости звука в материале полосы и материале дефекта очень близки друг к другу. Также можно сделать вывод, что на точность предложенного метода в большей степени влияет изменение параметра *C*, чем ρ. Таким образом продемонстрированы границы применения различных нейросетевых моделей для идентификации дефектов с различными механическими параметрами.

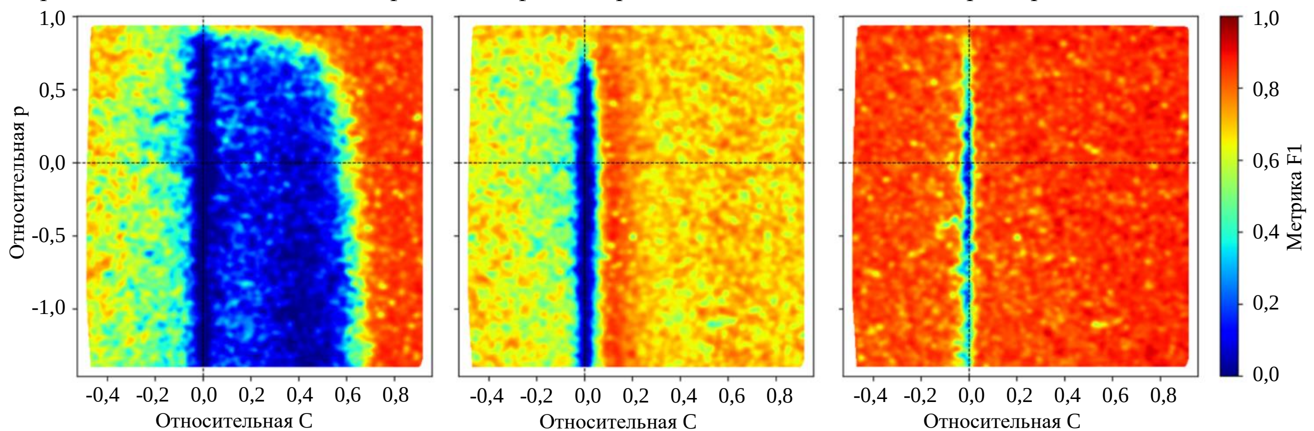


Рис. 7. Влияние параметров дефекта на точность работы нейронных сетей.
Нейронная сеть *A* слева, нейронная сеть *B* в центре, нейронная сеть *C* справа

Таким образом, можно заключить, что разработанная авторами модель нейронной сети представляет собой важный научный шаг в области неразрушающего контроля, обеспечивая эффективные инструменты для визуализации внутренних дефектов и создавая новые перспективы для применения в индустрии и научных исследованиях [24–25].

Обсуждение и заключение. Полученные результаты предоставляют новый взгляд на область неразрушающего контроля и его потенциал в обнаружении внутренних дефектов в различных материалах и структурах. В представленном исследовании предложен новаторский метод, основанный на применении сверточных нейронных сетей, с целью экспрессной диагностики дефектов в структуре материалов. Ключевым аспектом данной научной работы является продемонстрированная потенциальная эффективность применения сверточных нейронных сетей для повышения качества ультразвуковой визуализации. Авторы разработали модель, предназначенную для неразрушающего контроля, а также сформировали соответствующие наборы данных, используемых для обучения искусственных нейронных сетей. Эта сверточная нейросетевая модель способна не только точно определять форму, но и положение, и ориентацию внутренних дефектов в твердом материале. Полученные экспериментальные данные демонстрируют информативность ультразвукового сигнала, а также его способность точно передавать реальные характеристики внутренних дефектов.

Авторы проанализировали несколько типов дефектов, в каждом из которых уделяется особое внимание: в первом случае дефект классифицируется как *A* и моделируется в виде полости, во втором случае — как *B* и представляет собой жесткое включение, в третьем — как *C*, с различными механическими параметрами дефекта. Во всех сценариях исследования выявлено важное воздействие размера дефекта на точность ультразвуковой визуализации. Кроме того, полученные результаты однозначно подтверждают, что выбор частоты зондирующего сигнала имеет критическое значение и должен быть оптимизирован так, чтобы длина волны была значительно меньше размеров внутренних дефектов.

После проведения системной валидации сверточных нейронных сетей в контексте каждого из вышеупомянутых типов дефектов (*A*, *B и C*) для различных значений механических характеристик дефектов был установлен диапазон значений механических параметров дефекта, в пределах которого предложенный метод не обеспечивает достаточно качественную визуализацию.

В заключение следует отметить, что разработанные в ходе данного исследования методики и технические решения имеют большое значение для дальнейших исследований в области дефектоскопии и решения обратных задач в широком контексте научных и практических приложений.

Список литературы

1. Samanta S., Mandal A., Thingujam J.S. Application of ANN in Identifying Defects in Impacted Composite. *Procedia Materials Science*. 2014;6:926–930. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.162

2. Bar H.N., Bhat M.R., Murthy C.R.L. Identification of Failure Modes in GFRP Using PVDF Sensors: ANN Approach. *Composite Structures*. 2004;65(2):231–237. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.10.019

3. Dong-Fang Chen, Xia-Ting Feng, Ding-Ping Xu, Quan Jiang, Cheng-Xiang Yang, Pin-Pin Yao. Use of an Improved ANN Model to Predict Collapse Depth of Thin and Extremely Thin Layered Rock Strata during Tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016;51:372–386. https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.09.010

4. Черпаков А.В., Акопьян В.А., Соловьев А.Н. Алгоритм многопараметрической идентификации дефектов стержневых конструкций. *Техническая акустика*. 2013;13:1–11.

5. Rajeswari C., Sathiyabhama B., Devendiran S., Manivannan K. A Gear Fault Identification Using Wavelet Transform, Rough Set Based GA, ANN and C4.5 Algorithm. *Procedia Engineering*. 2014;97:1831–1841. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.337

6. Соловьев А.Н., Шевцов М.Ю. Реконструкция дефектов в упругих телах сочетанием генетического алгоритма и метода конечных элементов. *Вестник Донского государственного технического университета.* 2016;16(2):5–12. https://doi.org/10.12737/19686

7. Yasser S. Mohamed, Hesham M. Shehata, Mohamed Abdellatif, Taher H. Awad. Steel Crack Depth Estimation Based on 2D Images Using Artificial Neural Networks. *Alexandria Engineering Journal*. 2019;58(4):1167–1174. https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.001

8. Yanfeng Gong, Hongliang Shao, Jun Luo, Zhixue Li. A Deep Transfer Learning Model for Inclusion Defect Detection of Aeronautics Composite Materials. *Composite Structures*. 2020;252:112681. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112681

9. Adisorn Sirikham, Yifan Zhao, Haochen Liu, Yigeng Xu, Stewart Williams, Jörn Mehnen. Three-dimensional Subsurface Defect Shape Reconstruction and Visualisation by Pulsed Thermography. *Infrared Physics & Technology*. 2020;104:103151. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103151

10. Luiz Felipe Simões Hoffmann, Francisco Carlos Parquet Bizarria, José Walter Parquet Bizarria. Detection of Liner Surface Defects in Solid Rocket Motors Using Multilayer Perceptron Neural Networks. *Polymer Testing*. 2020;88:106559. 10.1016/j.polymertesting.2020.106559

11. Vladimir Puzyrev. Deep Learning Electromagnetic Inversion with Convolutional Neural Networks. *Geophysical Journal International*. 2019;218(2):817–832. https://doi.org/10.1093/gji/ggz204

12. Soloviev A.N., Sobol B.V., Vasiliev P.V. Ultrasonic and Magnetic Flow Inspection Methods of Identification of Cracks in the Pipe Coupled with Artificial Neural Networks. In book: Parinov I., Chang S.H., Jani M. (eds). *Advanced Materials*. *Springer Proceedings in Physics*. Cham: Springer; 2017. P. 381–395. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56062-5_32

13. Soloviev A., Sobol B., Vasiliev P., Senichev A. Generative Artificial Neural Network Model for Visualization of Internal Defects of Structural Elements. In book: Parinov I., Chang S.H., Long B. (eds). *Advanced Materials. Springer Proceedings in Materials*. Cham: Springer; 2020. P. 587–595. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2_48

14. Sobol B.V., Soloviev A.N., Rashidova E.V., Vasiliev P.V. Identification of Crack-like Defect and Investigation of Stress Concentration in Coated Bar. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019;(4):165–174. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.4.16

15. Fang X., Luo X., Jiong Tang. Structural Damage Detection Using Neural Network with Learning Rate Improvement. *Computers and Structures*. 2005;83(25–26):2150–2160. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.02.029

16. Soloviev A., Sobol B., Vasiliev P. Identification of Defects in Pavement Images Using Deep Convolutional Neural Networks. In book: Parinov I., Chang S.H., Kim Y.H. (eds). *Advanced Materials. Springer Proceedings in Physics*. Cham: Springer; 2019. P. 615–626. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7_46

17. Kane Yee. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1966;14(3):302–307. https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693

18. LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., et al. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*. 1989;1(4):541–551. https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541

19. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press; 2016. 777 p.

20. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Communications of the ACM*. 2017;60(6):1097–1105. http://dx.doi.org/10.1145/3065386

21. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. New York City, UA: IEEE; 2016. P. 770–778 https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90

22. De Angelo M., Spagnuolo M., D'Annibale F., Pfaff A., Hosche K., Misra A., et al. The Macroscopic Behavior of Pantographic Sheets Depends Mainly on Their Microstructure: Experimental Evidence and Qualitative Analysis of Damage in Metallic Specimens. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2019;31:1181–1203. https://doi.org/10.1007/s00161-019-00757-3

23. Nagatani Y., Okumura S., Wu S., Matsuda T. Two-dimensional Ultrasound Imaging Technique Based on Neural Network Using Acoustic Simulation. *arXiv preprint*. arXiv:2004.08775. 2020. https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.08775

24. Solov'ev A.N., Sobol' B.V., Vasil'ev P.V. Ultrasonic Location of Inner Crack Defects in a Compound Elastic Cylinder Using an Artificial Neural-Network Apparatus. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016;52(3):119–124. https://doi.org/10.1134/S1061830916030098

25. Soloviev A.N., Sobol B.V., Vasiliev P.V., Senichev A.V., Novikova A.I. Identification of Defects in a Coating Wedge Based on Ultrasonic Non-destructive Testing Methods and Convolutional Neural Networks. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2023;(1):111–124. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.1.11

References

1. Samanta S, Mandal A, Thingujam JS. Application of ANN in Identifying Defects in Impacted Composite. *Procedia Materials Science*. 2014;6:926–930. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.162

2. Bar HN, Bhat MR, Murthy CRL. Identification of Failure Modes in GFRP Using PVDF Sensors: ANN Approach. *Composite Structures*. 2004;65(2):231–237. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.10.019

3. Dong-Fang Chen, Xia-Ting Feng, Ding-Ping Xu, Quan Jiang, Cheng-Xiang Yang, Pin-Pin Yao. Use of an Improved ANN Model to Predict Collapse Depth of Thin and Extremely Thin Layered Rock Strata during Tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016;51:372–386. https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.09.010.

4. Cherpakov AV, Akopyan VA, Soloviev AN. Algorithm for Multi-parameter Identification of Defects in Frame Structures. *Technical Acoustics*. 2013;13:1–11. (In Russ.)

5. Rajeswari C, Sathiyabhama B, Devendiran S, Manivannan K. A Gear Fault Identification Using Wavelet Transform, Rough Set Based GA, ANN and C4.5 Algorithm. *Procedia Engineering*. 2014;97:1831–1841. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.337

6. Solovyev AN, Shevtsov MYu. Reconstruction of Defects in Elastic Bodies by Combination of Genetic Algorithm and Finite Element Method. *Vestnik of DSTU.* 2016;16(2):5–12. https://doi.org/10.12737/19686 (In Russ.)

7. Yasser S Mohamed, Hesham M Shehata, Mohamed Abdellatif, Taher H Awad. Steel Crack Depth Estimation Based on 2D Images Using Artificial Neural Networks. *Alexandria Engineering Journal*. 2019;58(4):1167-1174. https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.001

8. Yanfeng Gong, Hongliang Shao, Jun Luo, Zhixue Li. A Deep Transfer Learning Model for Inclusion Defect Detection of Aeronautics Composite Materials. *Composite Structures*. 2020;252:112681. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112681

9. Adisorn Sirikham, Yifan Zhao, Haochen Liu, Yigeng Xu, Stewart Williams, Jörn Mehnen. Three-Dimensional Subsurface Defect Shape Reconstruction and Visualisation by Pulsed Thermography. *Infrared Physics & Technology*. 2020;104:103151. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103151

10. Luiz Felipe Simões Hoffmann, Francisco Carlos Parquet Bizarria, José Walter Parquet Bizarria. Detection of Liner Surface Defects in Solid Rocket Motors Using Multilayer Perceptron Neural Networks. *Polymer Testing*. 2020;88:106559. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.10655

11. Vladimir Puzyrev. Deep Learning Electromagnetic Inversion with Convolutional Neural Networks. *Geophysical Journal International*. 2019;218(2):817–832. https://doi.org/10.1093/gji/ggz204

12. Soloviev AN, Sobol BV, Vasiliev PV. Ultrasonic and Magnetic Flow Inspection Methods of Identification of Cracks in the Pipe Coupled with Artificial Neural Networks. In book: Parinov I, Chang SH, Jani M. (eds). *Advanced Materials. Springer Proceedings in Physics*. Cham: Springer; 2017. P. 381–395. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56062-5_32

13. Soloviev A, Sobol B, Vasiliev P, Senichev A. Generative Artificial Neural Network Model for Visualization of Internal Defects of Structural Elements. In book: Parinov I, Chang SH, Long B. (eds). *Advanced Materials. Springer Proceedings in Materials*. Cham: Springer; 2020. P. 587–595. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2_48

14. Sobol BV, Soloviev AN, Rashidova EV, Vasiliev PV. Identification of Crack-like Defect and Investigation of Stress Concentration in Coated Bar. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019;(4):165–174. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.4.16

15. Fang X, Luo X, Jiong Tang. Structural Damage Detection Using Neural Network with Learning Rate Improvement. *Computers and Structures*. 2005;83(25–26):2150–2160. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.02.029

16. Soloviev A, Sobol B, Vasiliev P. Identification of Defects in Pavement Images Using Deep Convolutional Neural Networks. In book: Parinov I, Chang SH, Kim YH. (eds). *Advanced Materials. Springer Proceedings in Physics*. Cham: Springer; 2019. P. 615–626. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7_46

17. Kane Yee. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1966;14(3):302–307. https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693

18. LeCun Y, Boser B, Denker JS, Henderson D, Howard RE, Hubbard W, et al. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*. 1989;1(4):541–551. https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541

19. Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press; 2016. 777 p.

20. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Communications of the ACM*. 2017;60(6):1097–1105. http://dx.doi.org/10.1145/3065386

21. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. New York City, UA: IEEE; 2016. P. 770–778 https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90

22. De Angelo M, Spagnuolo M, D'Annibale F, Pfaff A, Hosche K, Misra A, et al. The Macroscopic Behavior of Pantographic Sheets Depends Mainly on Their Microstructure: Experimental Evidence and Qualitative Analysis of Damage in Metallic Specimens. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2019;31:1181–1203. https://doi.org/10.1007/s00161-019-00757-3

23. Nagatani Y, Okumura S, Wu S, Matsuda T. Two-dimensional Ultrasound Imaging Technique Based on Neural Network Using Acoustic Simulation. *arXiv preprint*. arXiv:2004.08775. 2020. https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.08775

24. Solov'ev AN, Sobol' BV, Vasil'ev PV. Ultrasonic Location of Inner Crack Defects in a Compound Elastic Cylinder Using an Artificial Neural-Network Apparatus. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016;52(3):119–124. https://doi.org/10.1134/S1061830916030098

25. Soloviev AN, Sobol BV, Vasiliev PV, Senichev AV, Novikova AI. Identification of Defects in a Coating Wedge Based on Ultrasonic Non-destructive Testing Methods and Convolutional Neural Networks. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2023;(1):111–124. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.1.11

Поступила в редакцию 30.10.2023
Поступила после рецензирования 24.11.2023
Принята к публикации 05.12.2023

Об авторах:

Павел Владимирович Васильев, старший преподаватель кафедры информационных технологий Донского государственного технического университета (РФ, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 4914-7944, ScopusID, ORCID, lyftzeigen@mail.ru

Аркадий Николаевич Соловьев, доктор физико-математических наук, профессор Крымского инженерно-педагогический университета имени Февзи Якубова (РФ, 295015, г. Симферополь, пер. Учебный, д. 8), SPIN-код: 8087-8998, ResearcherID, ScopusID, ORCID, solovievarc@gmail.com

Борис Владимирович Соболь, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий Донского государственного технического университета (РФ, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 5610-9300, Scopus ID, ORCID, b.sobol@mail.ru

Александр Александрович Ляпин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем в строительстве Донского государственного технического университета (РФ, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 9961-8883, ScopusID, ORCID, lyapin.rnd@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:
П.В. Васильев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования.
А.Н. Соловьев — постановка задачи, формирование выводов.
Б.В. Соболь — постановка задачи, доработка текста.
А.А. Ляпин — обработка и анализ результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 30.10.2023
Revised 24.11.2023
Accepted 05.12.2023

About the Authors:

Pavel V. Vasiliev, Senior Lecturer of the Information Technologies Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 4914-7944, Scopus ID, ORCID, lyftzeigen@mail.ru

Arkadiy N. Soloviev, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (8, Uchebnyy Ln, Simferopol, 295015, RF), SPIN-code: 8087-8998, ResearcherID, ScopusID, ORCID, solovievarc@gmail.com

Boris V. Sobol, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Information Technologies Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 5610-9300, Scopus ID, ORCID, b.sobol@mail.ru

Alexandr A. Lyapin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Information Systems in Civil Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 9961-8883, ScopusID, ORCID, lyapin.rnd@yandex.ru

Claimed contributorship:
PV Vasiliev: basic concept formulation, research objectives and tasks.
AN Soloviev: setting the task, drawing conclusions.
BV Sobol: setting the task, finalizing the text.
AA Lyapin: processing and analysis of the results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.